



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Grado/Máster
CURSO 2020/21

*ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA APLICACIÓN
DE TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS
PARA LA ESTIMACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL
BUQUE*

Máster en Ingeniería Naval y Oceánica

ALUMNA/O

David Castellano Acosta

TUTORAS/ES

Lucía Santiago Caamaño

FECHA

SEPTIEMBRE 2021

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL BUQUE.

DAVID CASTELLANO ACOSTA.

*Siempre me observas desde el cielo,
esta meta es por ti abuelo.*

RESUMEN

Este proyecto se centra en la aplicación experimental de la detección en tiempo real de la estabilidad de un buque pesquero. Estas aplicaciones han surgido bajo la necesidad de lograr aumentar la seguridad en un oficio tan peligroso como es la pesca en alta mar, donde se producen un gran número de accidentes graves, sobre todo en buques pesqueros medianos y pequeños. Para evitar estos sucesos se pretende, con la ayuda de la metodología propuesta, estimar los cambios que se producen durante las diferentes fases de operación del buque según sus condiciones de carga, de este modo conseguir el objetivo de aumentar la seguridad, en este caso del sector pesquero.

Para comprobar el comportamiento y desempeño de la herramienta de estudio se han realizado una serie de ensayos experimentales con un modelo a escala de un pesquero, de esta forma se obtendrán los datos del balance del buque, según sus situaciones de carga y del comportamiento frente a las diferentes condiciones del mar. Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos de los ensayos para luego discutir si se han logrado alcanzar los objetivos deseados, y verificar si el comportamiento del detector es válido o requiere modificaciones y como se podría mejorar.

ABSTRACT

This Project focuses on the experimental application of real-time detection of the stability of a fishing vessel. These applications have arisen out of the need to increase safety in a profession as dangerous as fishing on the open seas, where a large number of serious accidents occur, especially in medium and small fishing vessels. In order to avoid these events, the proposed methodology aims to estimate the changes that occur during the different phases of the vessel's operation according to her loading conditions, thus achieving the objective of increasing safety, in this case in the fishing sector.

In order to verify the behaviour and performance of the study tool, a series of experimental tests have been carried out with a scale model of a fishing vessel, in in this way roll data of the vessel will be obtained, according to her load situations and behaviour in different sea conditions. Finally, the results obtained from the tests will be analysed in order to discuss whether the desired objectives have been achieved, and to verify whether the behaviour of the detector is valid or requires modifications and how it could be improved.

RESUMO

Este proxecto céntrase na aplicación experimental da detección en tempo real da estabilidade dun buque pesqueiro. Estas aplicacións xurdiron baixo a necesidade de lograr aumentar a seguridade nun oficio tan perigoso como é a pesca en alta mar, onde se producen un gran número de accidentes graves, sobre todo en buques pesqueiros medianos e pequenos. Para evitar estes sucesos preténdese, coa axuda da metodoloxía proposta, estimar os cambios que se producen durante as diferentes fases de operación do buque segundo as súas condicións de carga, deste xeito conseguir o obxectivo de aumentar a seguridade, neste caso do sector pesqueiro.

Para comprobar o comportamento e desempeño da ferramenta de estudo realizáronse unha serie de ensaios experimentais cun modelo a escala dun pesqueiro, desta forma obteranse os datos do balance do buque, segundo as súas situacións de carga e do comportamento fronte ás diferentes condicións do mar. Finalmente, analizaranse os resultados obtidos dos ensaios para logo discutir se se lograron alcanzar os obxectivos desexados, e verificar se o comportamento do detector é válido ou require modificacións e como se podería mellorar.

ÍNDICE

RESUMEN.....	2
ABSTRACT	3
RESUMO	4
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	7
ÍNDICE DE TABLAS	8
1 INTRODUCCIÓN	9
2 ANTECEDENTES	11
3 OBJETIVO	13
4 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA A VALIDAR	14
4.1 ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ).....	15
4.2 EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION (EMD)	16
4.3 TRANSFORMADA DE HIBERT-HUANG (HHT)	17
4.4 DETECTOR.....	19
4.5 FILTRADO.....	22
5 CARACTERÍSTICAS DEL CANAL.....	23
6 INSTRUMENTACIÓN	25
6.1 PROGRAMAS	25
6.2 SENSORES.....	26
7 BUQUE BASE Y MODELO A ESCALA.....	27
7.1 DESCRIPCIÓN DE CONDICIONES DE CARGA.....	29
8 ENSAYOS EXPERIMENTALES.....	30
8.1 PRUEBA DE ESTABILIDAD	30
8.2 ENSAYO DE DECAIMIENTO	32
9 ENSAYOS DE CANAL	37
9.1 PREPARACIÓN DEL CANAL.....	38
9.2 DESCRIPCIÓN DE LAS OLAS.....	38
9.3 MATRIZ DE ENSAYO	39
9.4 PROCESADO DE DATOS.....	40
10 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	41
10.1 ENSAYO 1 ($H_w = 3m, \omega = 0.956 \text{ rad/s}$)	43
10.2 ENSAYO 2 ($H_w = 3m, \omega = 0.717 \text{ rad/s}$)	44
10.3 ENSAYO 3 ($H_w = 3m, \omega = 0.574 \text{ rad/s}$)	45
10.4 ENSAYO 4 ($H_w = 3m, \omega = 0.478 \text{ rad/s}$).....	46

10.5	RESUMEN DE FRECUENCIA NATURAL DE BALANCE PARA LAS DIFERENTES CONDICIONES DE CARGA Y ESTADO DE MAR	47
10.6	RESUMEN DE RESULTADOS DEL DETECTOR Y MATRIZ DE CONFUSIÓN DEL DETECTOR.....	47
11	DISCUSIÓN	48
12	CONCLUSIONES	49
13	BIBLIOGRAFÍA	51

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Mapa de calor pesquero, 2020/2021 (Global Fishing Watch, 2021).....	9
Ilustración 2: Resumen anual de siniestros e incidentes (EMSA, 2019).....	10
Ilustración 3: Distribución de esloras de buques pesqueros involucrados entre 2011-2018 (EMSA, 2019).....	10
Ilustración 4: Factores de accidentes en pesqueros entre 2011-2018 (EMSA, 2019) .	11
Ilustración 5: Sistema de monitorización de estabilidad transversal (Santiago Caamaño, Galeazzi, et al., 2019).....	14
Ilustración 6: Proceso EMD+HHT	18
Ilustración 8: Representación gráfica de prueba de hipótesis	20
Ilustración 9: Canal de experiencias	23
Ilustración 10: Programa del generador de olas.....	25
Ilustración 11: Programa MT Manager (Xsens, 2021).....	26
Ilustración 12: Sensor IMU (Xsens, 2021).....	26
Ilustración 13: Caja de cuadernas (Santiago Caamaño, 2019)	27
Ilustración 14: Buque modelo.....	28
Ilustración 15: Cubierta del modelo y ubicación del sensor.....	29
Ilustración 16: Interior del modelo	29
Ilustración 17: Disposición del modelo para la prueba de estabilidad.....	30
Ilustración 18: Ensayo 1 LC1	33
Ilustración 19: Ensayo 2 LC1	33
Ilustración 20: Ensayo 4 LC1	34
Ilustración 21: Ensayo 6 LC1	34
Ilustración 22: Ensayo 8 LC1	35
Ilustración 23: Ensayo 2 LC2	35
Ilustración 24: Ensayo 3 LC2	36
Ilustración 25: Ensayo 4 LC2	36
Ilustración 28: Modelo dispuesto para los ensayos	38
Ilustración 29: Ejemplo ensayo de canal (Ensayo 4 LC1)	40
Ilustración 30: Primera serie de 4 ensayos LC1	41
Ilustración 31: Análisis Ensayo 1. (Hw=3m, $we = 0.956$ rad/s.).....	43
Ilustración 32: Análisis Ensayo 2. (Hw=3m, $we=0.717$ rad/s).....	44
Ilustración 33: Análisis Ensayo 3. (Hw=3m, $we=0.574$ rad/s).....	45
Ilustración 34: Análisis Ensayo 4. (Hw=3m, $we=0.478$ rad/s).....	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Dimensiones principales	27
Tabla 2: Dimensiones modelo.....	28
Tabla 3: Condiciones de Carga.....	30
Tabla 4: Distancias desplazamiento de pesos y escoras	31
Tabla 5: Desplazamientos, KM y KG	31
Tabla 7: KG y GM	32
Tabla 8: Valores de Periodo.....	37
Tabla 9: Valores de la frecuencia natural.....	37
Tabla 12: Matriz de ensayo.....	39
Tabla 13: Condiciones de mar	42
Tabla 14: Frecuencia natural de balance objetivo	47
Tabla 15: Resumen de frecuencia natural de balance	47
Tabla 16: Resumen resultados detector.....	47
Tabla 17: Matriz de confusión del detector.....	48

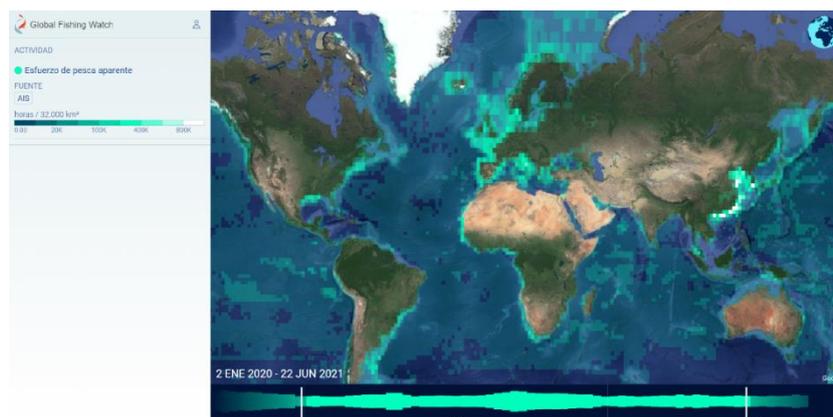
1 INTRODUCCIÓN

Considerando la importancia de la pesca en España y sobre todo en Galicia, que concentra más del 10% de descargas de pescado de la Unión Europea, aportando un 20% de la producción marina europea. Además de las 81 ramas de actividad económica gallega, 64 de ellas tienen relación, directa o indirecta, con el sector pesquero, generando un gran impacto económico (EuropaPress, 2019).

Es importante destacar que la mayoría de los buques de pesca registrados son buques con una eslora inferior a los 12 metros, este tipo de buques son mucho más sensibles y tienen un riesgo mayor que buques de mayor tamaño (Comisión Europea, n.d.).

En cuanto a la situación internacional se refiere, la superficie mundial dedicada a la pesca cuadruplica al sector agrícola, esto se da porque por cada kilómetro cuadrado dedicado a la agronomía, cuatro eran zonas donde operaban los grandes del sector pesquero. A continuación, como ejemplo se muestra un mapa de calor para poder ver los puntos donde se concentró la pesca desde el inicio de 2020 hasta mediados de 2021 (Global Fishing Watch, 2021).

Ilustración 1: Mapa de calor pesquero, 2020/2021 (Global Fishing Watch, 2021)



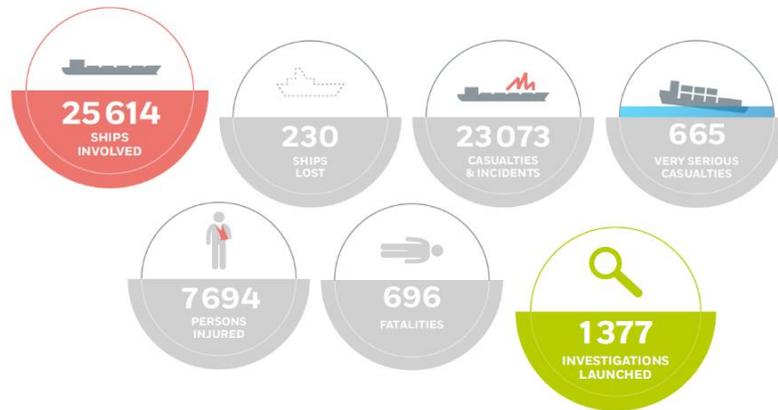
Donde se pueden ver las zonas con mayor intensidad de actividad pesquera, zonas como el Atlántico noroeste, noroeste del Pacífico, Sudamérica y África Occidental. Los principales países productores de la pesca de captura son China, Indonesia, Perú, La India, Rusia, Estados Unidos de América y Vietnam, los cuales representaron casi el 50% de la producción total de la pesca de captura mundial (FAO Organizational, 2020).

Echando la vista atrás, se puede comparar de forma clara la evolución que se ha producido en el sector, buques mejor preparados tecnológicamente, ecológicamente y propulsivamente. La implementación de la electrónica ha hecho posible la facilidad de establecer comunicaciones con tierra, capacidad de seguimiento de los buques, monitorización de los diferentes sistemas del buque al alcance del capitán en el puente.

Aunque a pesar de toda esta posibilidad de control y seguimiento, se siguen produciendo siniestros e incidentes en la mar, como se puede comprobar en la EMSA (Agencia de Seguridad Marítima Europea), con una cifra de 25.614 buques involucrados en dichos siniestros, como se puede ver en la siguiente ilustración, con datos comprendidos entre los años 2011 y 2018 (EMSA, 2019).

Ilustración 2: Resumen anual de siniestros e incidentes (EMSA, 2019)

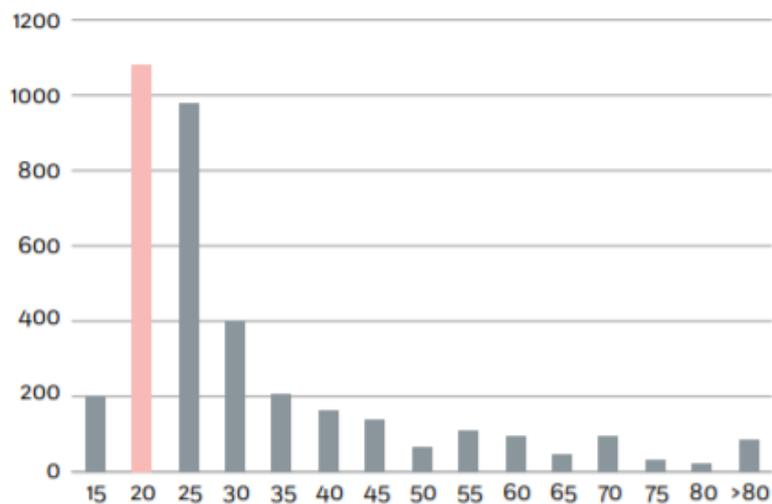
KEY FIGURES FOR 2011-2018



En este periodo, se puede ver que han perdido la vida un total de 696 personas en la mar en buques abanderados por países miembros de la UE. Contemplando los datos, hace reflexionar sobre el peligro que conlleva trabajar en el sector marino. Por este motivo, actualmente se trabaja en el estudio de soluciones que puedan reducir estos datos.

Uno de los factores más destacados es la falta de reglamentación para los buques de pesca, debido a que solo existe el Protocolo de Torremolinos (International Maritime Organization, 1997), el cual se aplica a buques de más de 24 metros de eslora. Por otro lado, los pesqueros de menos de 24 metros de eslora, en la mayoría de los países, solo poseen documentos voluntarios. Por este motivo, un 55,4% de las embarcaciones implicadas en siniestros o incidentes marítimos se encuentran dentro del rango de eslora de 15-25 metros, como se puede ver en la ilustración 3:

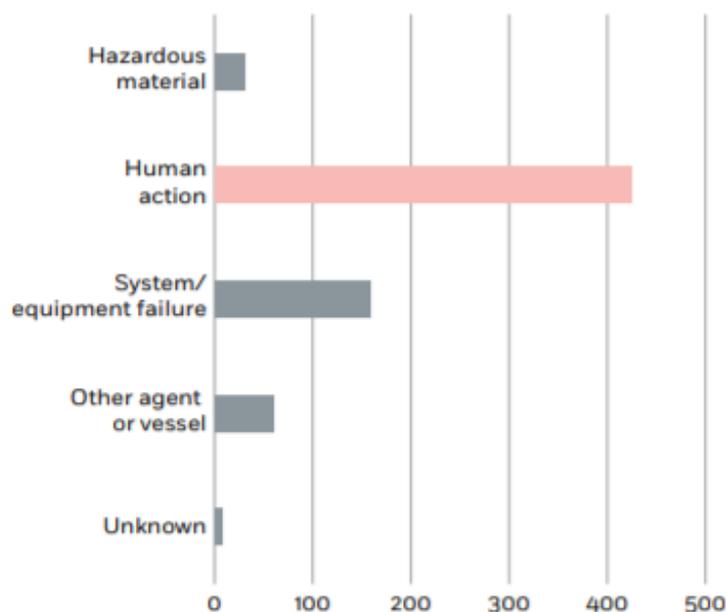
Ilustración 3: Distribución de esloras de buques pesqueros involucrados entre 2011-2018 (EMSA, 2019)



En España los buques con una eslora inferior a 24 metros han de cumplir el Real Decreto 543/2007 de la Dirección General de la Marina Mercante. En donde se establece una diferencia de criterios de estabilidad para los buques de entre 12 y 24 metros de eslora y los buques de menos de 12 metros de eslora.

Además, siempre está presente el factor humano, en la ilustración 4 se puede observar el impacto que representa este factor, uno de los mayores problemas se debe principalmente a la falta de una correcta formación en el campo de la estabilidad del buque de la tripulación en los pesqueros de pequeña envergadura. Estos buques son mucho más vulnerables a las condiciones adversas de la mar, las cuales provocan movimientos más amplios de balance, llegando a influir negativamente con inconvenientes como el embarque de agua, o incluso llegando a provocar el hundimiento del buque (International Maritime Organization, 2008).

Ilustración 4: Factores de accidentes en pesqueros entre 2011-2018 (EMSA, 2019)



Se intentan conseguir por medio de, una adecuada formación de la tripulación con la realización de cursos, y así proporcionar conocimientos y concienciarlos del abanico de factores de riesgo que pueden sufrir a bordo, como por ejemplo sobrecargas, descuidarse con puertas abiertas, etc.

2 ANTECEDENTES

Echando la vista atrás, sobre 1940 J.J Rahola, basándose en el análisis de diferentes accidentes marítimos ideó un método donde establecía una serie de valores mínimos de los parámetros de estabilidad del buque. Su estudio tuvo un gran impacto y aceptación, hasta el punto de llegarse a aplicar en muchos países, hasta que finalmente sobre el año 1968 la Organización Marítima Internacional (OMI) publicó una recomendación internacional sobre criterios de estabilidad, fundamentados en el método que propuso Rahola (Rahola, 1939).

Este suceso fue el comienzo de la investigación con el objetivo de encontrar métodos y normas para lograr asegurar la integridad de los buques, aplicando una serie de estándares de estabilidad para los diferentes tipos de navíos.

Hasta finales de 1950, la estabilidad se trataba como un estudio estático y se centraban en la mejora de métodos de cálculo de brazos adrizantes y estimaciones de momentos escorantes. El movimiento de balance de un buque navegando sobre olas se consideraba sobre lo propuesto por Froude y Krylov, los cuales consideraban olas regulares y de pequeñas inclinaciones. Unos años después, con la publicación del trabajo de Denis y Pierson en 1953 se comenzó a investigar la estabilidad del buque en el mar considerándolo como un sistema dinámico (Denis & Pierson, 1953).

A partir de 1975, se comenzaron a celebrar de forma periódica la Conferencia sobre la Estabilidad de los Buques y Vehículos Oceánicos. Los objetivos de la conferencia fueron aportar oportunidades para que las personas involucradas en la estabilidad, incluyendo diseño, operación, investigación y control, discutiesen los resultados de estudios a nivel internacional y así establecer su aplicación real final (SHIPSTAB, 2014).

Aunque los resultados obtenidos por todos estos estudios son relevantes y desde una perspectiva práctica la introducción de los estándares internacionales de la OMI haya significado un incremento en la seguridad del sector, continúan ocurriendo accidentes relacionados con la estabilidad. Por este motivo, nuevos retos surgen a medida que nuevos tipos y formas de buques se van creando.

Durante la última década, se dieron los primeros sistemas de guía de estabilidad basados en diagramas y posters. Caracterizados principalmente por traer la información predefinida de las condiciones de carga para que el capitán pudiese revisarlo siempre que fuera necesario. En sistemas basados por computadores, la evaluación de la estabilidad se basó en los datos de las condiciones de carga importadas manualmente por los tripulantes en el sistema. Este tipo de sistemas tienden a dejar abierta la opción de una inadecuada interpretación por parte de los tripulantes. Se han realizado una serie de estudios sobre diferentes alternativas de aplicación (Wolfson Unit, 2004).

En primer lugar, el Panel de Estabilidad es un método de presentación simplificado que se ha utilizado por la Dirección Marina de Noruega como por la Administración Marítima de Islandia. Este sistema es un requisito para los buques noruegos de 10.7 metros a 15 metros de eslora, pero en el caso de Islandia no se trata de un requisito, sino más bien como una recomendación. El objetivo es intentar transmitir de forma sencilla y visual el nivel de estabilidad relativo a los requisitos mínimos y algunos consejos operativos para mantener la estabilidad.

Otro sistema es la matriz de carga segura, EE. UU, se basa en un método simplificado de un trabajo concebido por Jhon Womack, arquitecto naval estadounidense. Se trata de una matriz que combina detalles de la condición de carga del buque según el contenido del tanque y la cantidad de captura a bordo, asignando un código de color para indicar los niveles de condición segura. Para los buques con una gran cantidad de tanques u otras contribuciones variables a la carga, el número de variables puede hacer que la matriz sea bastante complicada.

El siguiente se trata de la matriz de carga segura con monitorización de movimiento (Canadá), es un sistema que combina el control de movimiento con la matriz de carga segura desarrollada por Womack, presentada en un ordenador de a bordo. La condición de carga segura la desarrolla e instala un consultor en el sistema. El balance y cabeceo se miden constantemente para controlar la amplitud de los movimientos y derivar los valores medios de escora y compensación. Todas estas medidas se presentan

visualmente en la pantalla. Los valores límite de estos parámetros se definen para la embarcación y se dan advertencias cuando los valores medidos se acercan o superan los límites (González et al., 2012).

Por último, el Grupo de Integrado de Investigación en Ingeniería desarrolló un software de arquitectura naval, que mediante un módulo de estabilidad es capaz de calcular diferentes valores de estabilidad intacta y sin avería del buque. Además, se trata de un sistema capaz de calcular a mayores los valores de equilibrio del buque basándose en una determinada condición de carga, en estado intacto y averiado, incluidos asientos, escoras, calados e hidrostáticas. Esta aplicación se nombró como SKIPPER.

Para cumplir con lo que se considera una aplicación intuitiva, los parámetros que han de introducir los tripulantes en el sistema son los niveles de los tanques del buque, y valor y posición de la carga. Aun así, se modificó el sistema, haciendo que el usuario no necesite introducir la posición exacta de cada elemento de carga. Tendrá que seleccionar una zona del buque que tenga su propio centro de gravedad. En el supuesto de que la embarcación esté equipada con sondas remotas el sistema podrá tomar los valores de la sonda como entradas y así calcular la carga del tanque de forma automática (González et al., 2012).

Actualmente el Grupo Integrado de Ingeniería, con el objetivo de minimizar la interacción de la tripulación, se han propuesto una nueva generación de sistemas de apoyo de decisiones. Estos sistemas principalmente tienen como función evaluar de forma totalmente automática la estabilidad transversal del buque en tiempo real. Esta evaluación se fundamenta en la estimación de la altura metacéntrica (GM), parámetro indispensable para poder caracterizar el nivel de estabilidad del buque que está directamente relacionado con la frecuencia natural de balance.

Será necesario un software que monitorice constantemente la situación en la que se encuentre el buque, indicando en qué estado se encuentra la estabilidad en cada momento y así dar alarma en caso de que se produzca algún fallo en la estabilidad. Bajo este concepto se centra la metodología de estimación de la frecuencia natural del buque en tiempo real, este estudio ya se ha sometido a simulaciones de las que se han obtenido buenos resultados en cuanto al rendimiento del detector para identificar las diferentes situaciones que se puedan dar al variar las situaciones de carga. Los resultados de estas simulaciones se pueden ver en más detalle en el documento de (Santiago Caamaño, Galeazzi, et al., 2019).

3 OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo es la validación de una metodología para la estimación de la estabilidad del buque en tiempo real. Esta metodología permite la obtención de la frecuencia natural del buque en tiempo real a partir del movimiento de balance de este. Para ello se basa en técnicas de análisis de señales y de detección de cambios. Esta metodología ya se ha presentado con anterioridad en las siguientes publicaciones:

- Santiago Caamaño, L., Galeazzi, R., Nielsen, U. D., Míguez González, M., Díaz Casás, V. (2019). Real-time detection of transverse stability changes in fishing vessels.
- Santiago Caamaño, L., Galeazzi, R., Nielsen, U. D., Míguez González, M., Díaz Casás, V. (2019). On the application of change detection techniques for the stability monitoring of fishing vessels.

- Santiago Caamaño, L., Galeazzi, R., Nielsen, U. D., Míguez González, M., Díaz Casás, V. (2019). Experimental Validation of Transverse Stability Monitoring System for Fishing Vessels.

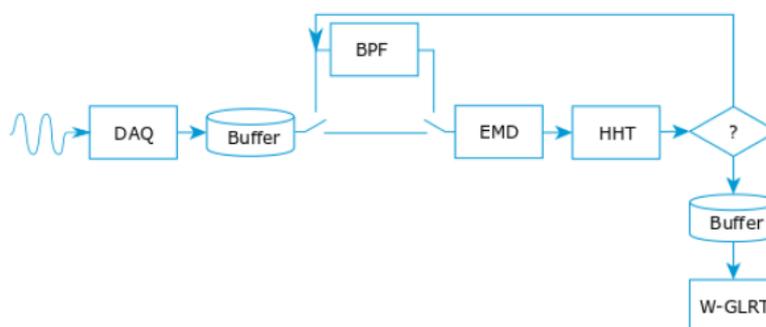
Para la validación se realizarán ensayos en un canal de experiencias hidrodinámicas de un buque de pesca en diferentes condiciones de carga, de modo que se pueda ver si la metodología mencionada es capaz de detectar dichos cambios. Además, se ensayarán diferentes condiciones de ola para ver la influencia de ésta en el funcionamiento de la metodología.

Esta metodología tiene como finalidad proporcionar una solución viable y que se pueda implementar en barcos pesqueros de menor envergadura, aportando ayuda a la tripulación advirtiéndole de la situación en la que se encuentra el buque, por ejemplo, en el caso de pérdida de estabilidad y que de este modo los tripulantes tengan tiempo para reaccionar y tomar una decisión para solucionar el problema, y a su vez evitar con esto un posible accidente.

4 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA A VALIDAR

La metodología que se va a validar propone el principio de estimador-detector, consiste en extraer información fiable de la frecuencia natural de balance, gracias al propio movimiento del balance obtenido. Además, evaluará cuando una frecuencia pueda llegar a desviarse considerablemente con el transcurso del tiempo. La metodología presentará una serie de características como el aprendizaje continuo en línea, una alta sensibilidad para diferenciar entre las posibles condiciones de carga u operación, la baja probabilidad de que se produzcan falsas alarmas y no requerir de intervenciones externas, entre otras. La metodología presenta el siguiente esquema, como se puede ver en la siguiente ilustración.

Ilustración 5: Sistema de monitorización de estabilidad transversal (Santiago Caamaño, Galeazzi, et al., 2019)



Primero, el movimiento de balance se medirá a través de una unidad de medición inercial y luego el sistema de adquisición de datos se encargará de almacenarlo en su correspondiente memoria intermedia.

Luego, se utilizará la combinación de Empirical Mode Decomposition (EMD), se trata de un método para descomponer una señal del dominio del tiempo y se considera un

proceso útil para el análisis de señales naturales, con la transformación de Hilbert-Huang (HHT) que se encarga de calcular la frecuencia instantánea.

La HHT está diseñada para funcionar con los datos no estacionarios y no lineales, como normalmente es el caso de las señales naturales. Será el encargado de estimar su frecuencia modal, aplicándose a cada modo de oscilación resultante. Entre todas las posibles frecuencias se seleccionará la frecuencia natural de balance del buque.

Se emplea HHT junto con el EMD en lugar de Transformada de Fourier (FFT) para de este modo distinguir mejor las frecuencias contenidas en el balance. Además, el error obtenido es menor como se puede ver en (Santiago Caamaño, Míguez González, et al., 2019), con respecto al que se produce en la FFT.

El sistema de detección se define como un sistema probabilístico, para así poder diferenciar entre las situaciones que se considerarán seguras, de las que no serán seguras. Con esto lo que se consigue es aumentar la fiabilidad y robustez del sistema de estimación de la estabilidad del buque. Consiste en una prueba de relación de probabilidad generalizada basada en el Teorema de Neyman-Pearson que se encargará de evaluar si la estimación actual de la frecuencia natural de balance se corresponde en una condición de carga segura o insegura. Además, se activa una alarma si se cruza el umbral de seguridad.

Y finalmente, se tiene un filtro de paso de banda cuya labor es seleccionar las frecuencias que se encuentran localizadas dentro del ancho de banda estimado y atenuando los datos que se encuentren fuera de estos parámetros. Una vez filtrada nuevamente la señal se procesará a través de los bloques anteriores.

4.1 ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ)

La labor del DAQ consiste fundamentalmente en medir y almacenar el movimiento de balance que se produce en el buque. Por tanto, para poder cumplir con el requisito de tiempo real, será necesario ajustar un tamaño determinado del buffer, es decir, un espacio de memoria de almacén de datos de forma temporal concreto.

Esta elección se ha llevado a cabo considerando principalmente que se trata de una flota, asumiendo un buque pesquero mediano en cuanto a sus dimensiones se refiere. Se decidió en base a una compensación realizada entre el tamaño mínimo de datos aportado por una estimación fiable de la frecuencia natural de balance, el tiempo que transcurre en detectarse la transición a una condición no segura y la resolución que se necesita para así poder distinguir entre las diferentes y posibles condiciones de operación.

La duración de la ventana de tiempo se estableció en los 3 minutos, esto se corresponde con un buffer capaz de almacenar 9000 muestras, porque 3 minutos son 180 segundos y realiza una toma de 50 muestras por segundo. A mayores, es muy importante la superposición entre las tomas de valores, consecutivas, del 75% con la que se trabajará, de este modo lo que se consigue es aumentar el número de estimaciones por cada ventana de tiempo, dando como resultado una estimación cada 45 segundos (Santiago Caamaño, 2019).

4.2 EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION (EMD)

La descomposición en modo empírico (EMD) se trata de una técnica aplicable en el dominio del tiempo capaz de facilitar la descomposición de una señal multifrecuencia en las componentes oscilatorias principales, denominadas funciones de modo intrínseco (IMF).

Las funciones de modo intrínsecas se definen como funciones que poseen amplitudes y frecuencias variables en el tiempo y además tienen igual número de extremos y cruces por cero, cuyas envolventes se caracterizan por ser simétricas con respecto a cero (Dätting y Schlurmann, 2004; Gupta et al., 2014; Huang et al. Al., 1998).

Para conseguir extraer las IMF se seguirá un proceso de cribado, este proceso consiste en conectar los máximos de la serie temporal mediante una serie de splines cúbicos y los mínimos de igual modo, de esta forma se obtendrá una curva media de ambos splines. Si la diferencia entre la curva media y la serie de tiempo cumple con las condiciones que impone el IMF, estas condiciones son igual número de extremos, cruces por cero y simetría a cero. Entonces, si esto sucede se restará de la serie temporal y se reiniciará el procedimiento, esto se repetirá hasta que se obtenga una función monótona como resultado.

Es importante obtener dicha función porque se caracteriza por no tener picos de frecuencia, que no tenga modo de frecuencia, o lo que es lo mismo que sea una única oscilación. Si la diferencia entre los datos obtenidos y la curva media sigue sin resultar un IMF continuará el cribado con la nueva serie de tiempo modificada, hasta obtener un IMF o hasta cumplir alguno de los criterios de detección.

El objetivo principal del EMD consiste en descomponer la serie temporal de movimiento de balance en sus correspondientes modos de oscilación, para seguidamente aplicar el Análisis Espectral de Hilbert. Al aplicar el EMD, la serie de tiempo del movimiento de balance se puede definir con la siguiente ecuación:

$$\phi(t) = \sum_{i=1}^{N_{IMF}} IMF_i(t) + R(t), \quad t \in [\bar{t} - 3min, \bar{t}] \quad 1$$

Donde:

- $R(t)$: es una función monótona.
- N_{IMF} : número total de IMF extraídos.
- \bar{t} : es el tiempo actual.

Cuando se dé el caso de excitaciones externas, en este estudio principalmente se tratará de las olas, los IMF de la serie temporal extraídos del movimiento de balance generalmente, incluyen modos oscilatorios debido a esta excitación, así como del balance natural de la embarcación, frecuencia, ruido del sensor y otros posibles componentes (Santiago Caamaño, 2019).

4.3 TRANSFORMADA DE HIBERT-HUANG (HHT)

Se trata de una herramienta analítica espectral, cuya labor se fundamenta en transformar una función de valor real, $x(t)$, en una expresión compleja, $z(t)$, variable con el tiempo. Se puede expresar del siguiente modo:

$$z(t) = x(t) + iy(t) \quad 2$$

Donde, $y(t)$ es la transformada de Hilbert-Huang de $x(t)$.

La transformada de Hilbert-Huang (HHT) representa una señal en función del tiempo-frecuencia-paradigma de energía. Otro punto que destacar del método es que la nueva señal que genera es fuertemente analítica, es decir, capaz de describirse en tres posibles términos, que son la amplitud instantánea, fase y frecuencia, que variarán con el tiempo.

El HHT se aplicará a cada IMF que se consiga extraer del movimiento de balance y de este modo se calculará la frecuencia instantánea que esté asociada, la cual generalmente variará con respecto al tiempo. Para obtener una estimación de frecuencia constante para cada IMF, la frecuencia instantánea media se obtendrá con respecto a la formulación de *Xie and Wang (2006)*.

$$\hat{w}_i = \frac{\sum_{k=1}^{L_\phi} w_i(k) a_i^2(k)}{\sum_{k=1}^{L_\phi} a_i^2(k)}; \quad i = 1, \dots, N_{IMF} \quad 3$$

Donde:

- L_ϕ : número de muestras incluidas en la ventana de tiempo $[t - 3 \text{ min}; t]$, dada la frecuencia de muestra (F_s).
- w_i : es la frecuencia instantánea.
- a_i : es la amplitud de i th IMF.

Una vez estimadas las frecuencias instantáneas medias de todas las funciones de modo intrínsecas, será fundamental la identificación de la frecuencia natural de balance entre estos.

Para obtener la frecuencia natural de balance del buque, es importante destacar una serie de restricciones en la frecuencia natural de balance, en el caso de buques pesqueros, porque durante sus respectivas operaciones de pesca en alta mar se producen cambios en la condición de carga del buque, entendiendo esto como ($0 \leq w_0 \leq \infty$). Pero es fundamental restringir dicha variación con el siguiente intervalo, ($w_{0,min} < w_0 < w_{0,máx}$), de este modo limitamos el intervalo entre dos valores específicos del buque y a su vez sencillos de obtener.

El valor máximo de la frecuencia natural ($w_{0,máx}$), es el correspondiente al GM máximo del buque en todas sus condiciones de carga, o lo que es lo mismo, la mayor condición de GM que se encuentre registrada en el cuaderno de estabilidad del buque. En caso de no tenerse otros datos disponibles, se puede estimar considerando que el centro de gravedad se encuentra ubicado en la línea base del buque. Por tanto, el GM máximo sería igual a la altura metacéntrica máxima (KM). La altura metacéntrica se puede

obtener mediante análisis de valores hidrostáticos, que se correspondan con todos los calados entre la rosca y el calado de verano.

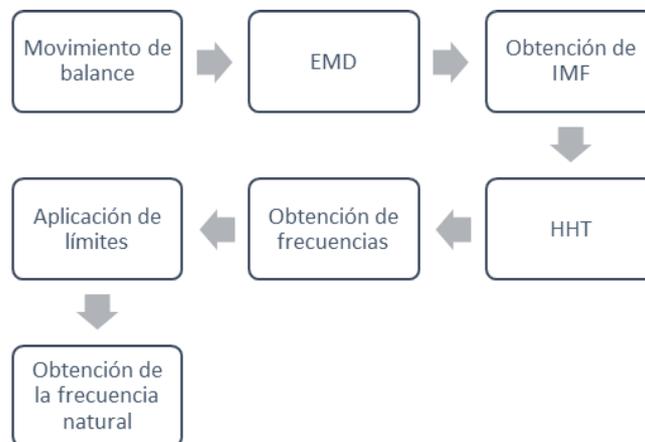
En lo referente a la frecuencia natural mínima ($w_{0,min}$), se ha de tener en cuenta que la estabilidad del buque no solo se encuentra limitada por el GM, porque realmente la estabilidad a grandes ángulos de balance suele ser más relevante. De acuerdo con lo referente al SOLAS, los motores marinos podrían detenerse cuando la escora estática supere los 15 grados, porque se puede suponer la incapacidad del buque para navegar si se produce dicha escora por medio de vientos laterales moderados.

Por tanto, $w_{0,min}$ se ha fijado como la equivalencia al GM mínimo necesario para conseguir mantener el ángulo de escora inferior a 15 grados bajo la acción de una racha de viento lateral de aproximadamente 30 nudos, esto se podrá calcular mediante las correspondientes pautas implantadas por la OMI. De este modo, aplicando los límites anteriores se aporta una visión conservadora de todos los posibles rangos de frecuencias naturales de balance que se podrían dar.

Las frecuencias obtenidas después de aplicarse el EMD+HHT se ordenan de mayor a menor debido al funcionamiento del método en sí. Esto tiene una consecuencia fundamental y se trata de la creación del siguiente vector $\Omega_{IMF} = [\hat{w}_1, \hat{w}_2, \dots, \hat{w}_{N,IMF}]^T$, donde $\hat{w}_1 > \hat{w}_2 > \hat{w}_{N,IMF}$.

Luego, al vector de frecuencias se le aplican los siguientes límites [$w_{0,min}, w_{0,máx}$] y las estimaciones que se encuentren fuera de este rango se descartarán. Llegados a este punto, se supone que la frecuencia natural de balance actual es la frecuencia más grande, $\hat{w}_0 = \max \Omega_{IMF}$ (Santiago Caamaño, 2019).

Ilustración 6: Proceso EMD+HHT



4.4 DETECTOR

Para considerar la incertidumbre inherente del proceso de estimación, se busca caracterizar estadísticamente la frecuencia natural de balance que se ha estimado con la ayuda de la identificación de la distribución de probabilidad que mejor se ajuste en cuanto a la condición de carga y estados posibles de la mar.

La seleccionada ha sido la distribución de Weibull, que describe la frecuencia natural de balance, \hat{w}_0 , y se define con la siguiente expresión:

$$\mathcal{W}(\hat{w}_0) = \frac{k}{\lambda} \cdot \left(\frac{\hat{w}_0}{\lambda}\right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{\hat{w}_0}{\lambda}\right)^k\right) \quad 4$$

Donde:

- k , representa el parámetro de forma.
- λ , se trata del parámetro de escala.

La mediana probabilística de la distribución de Weibull es una estimación robusta de la frecuencia natural de balance, es decir:

$$\hat{w}_0 = \lambda \cdot (\ln 2)^{\frac{1}{k}} \quad 5$$

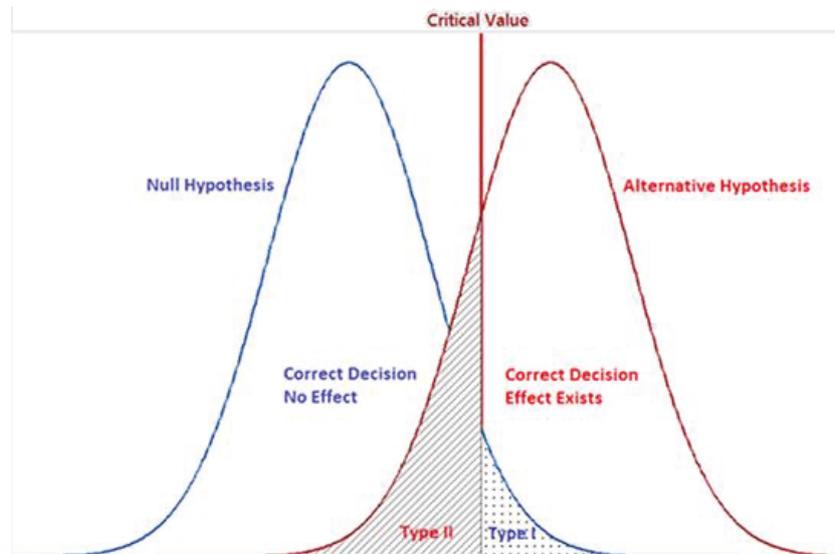
Los parámetros de escala y forma varían con respecto se va modificando la condición de carga del buque. Esto implica la creación de un detector que sea capaz de seguir los cambios de los parámetros, k y λ , de este modo será posible mantener actualizada las variaciones de la frecuencia. Evaluando así la condición de estabilidad en tiempo real del buque en cuestión.

El problema de detección se configura como una prueba de hipótesis, donde se evaluarán dos hipótesis. Por un lado, se tendrá la hipótesis nula (H_0) que se relaciona con la condición segura de operación en la que se encuentre el buque. Y por otra parte, se tendrá la hipótesis alternativa (H_1) que se trata de la condición insegura operativa del navío.

$$H_0 : \lambda_0 \cdot (\ln 2)^{\frac{1}{k_0}} \geq w_{0c}$$

$$H_1 : \lambda_1 \cdot (\ln 2)^{\frac{1}{k_1}} < w_{0c} \quad 6$$

Ilustración 7: Representación gráfica de prueba de hipótesis



En la estabilidad del buque, la seguridad de una determinada condición de carga depende de una serie de parámetros como son el GM, curva de escora, área bajo la curva de escora, francobordo, superficies libres e influencia de la ola. Pero es importante resaltar la importancia del GM en este estudio porque será el distintivo entre ambas casuísticas.

El valor límite del GM que se ha considerado entre los casos inseguro y seguro se ha tomado como 0,35 metros, porque se trata del GM mínimo requerido para los buques de pesca según la Organización Marítima Internacional (IMO).

Por lo cual, mediante la ecuación del GM descrita anteriormente, $GM = \frac{K_{xx} \cdot w_0^2}{g}$, se podrá conseguir la frecuencia natural de balance crítica del buque. Considerando que la mediana de Weibull se encuentra en función de los parámetros de escala y forma, se reescribirá el problema de detección como una prueba de parámetro estándar.

$$H_0 : \theta = \theta_0$$

$$H_1 : \theta \neq \theta_0$$

7

Donde:

- $\theta = [\lambda, k]^T$
- θ_0 , representación bajo H_0 .

Para poder decidir entre ambas hipótesis contemplando una serie de datos, se adoptará la prueba de razón de verosimilitud generalizada. Se trata de una prueba estadística que se basa en el teorema de Neyman-Pearson, su función es maximizar la probabilidad de detección en los casos de una probabilidad deseada de falsas alarmas (Kay, 1998).

Siendo $\Omega_0 = [\hat{w}_{0,K-N}, \dots, \hat{w}_{0,K}]^T$ el vector que contiene las últimas N estimaciones de la frecuencia natural de balance. Suponiendo que los elementos del vector sean independientes y a su vez idénticamente distribuidos, se podrá considerar su distribución con la siguiente expresión:

$$\mathcal{W}(\Omega_0; \theta) = \left(\frac{k}{\lambda^k}\right)^N \prod_{i=0}^{N-1} \left[\Omega_{0,i}^{k-1} * \exp\left(-\left(\frac{\Omega_{0,i}}{\lambda}\right)^k\right) \right] \quad 8$$

El detector decide que condición se corresponderá con H_1 del siguiente modo:

$$L_G = \frac{\mathcal{W}(\Omega_0; \hat{\theta}_1; H_1)}{\mathcal{W}(\Omega_0; \theta_0; H_0)} > \gamma \quad 9$$

Donde:

- $\hat{\theta}_1$, estimación de máxima probabilidad (MLE).
- θ , vector bajo la hipótesis H_1 .
- γ , probabilidad de falsas alarmas, es decir, el límite.

La estimación de máxima probabilidad $\hat{\theta}_1$ se obtiene maximizando $\mathcal{W}(\Omega_0; \theta)$ basándose en la hipótesis alternativa (H_1) de la siguiente forma:

$$\frac{\delta \ln(\mathcal{W}(\Omega_0; \hat{\theta}_1; H_1))}{\delta \theta_j} = 0 \quad 10$$

Los parámetros de forma y escala respectivamente se estimarán como:

$$\hat{\lambda}_1 = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \Omega_{0,i}^{\hat{k}_1} \right]^{1/\hat{k}_1} \quad 11$$

$$\frac{1}{\hat{k}_1} + \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \ln(\Omega_{0,i}) - \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \Omega_{0,i}^{\hat{k}_1} \ln(\Omega_{0,i})}{\sum_{i=0}^{N-1} \Omega_{0,i}^{\hat{k}_1}} \quad 12$$

Derivando la expresión explícita del detector con la ayuda de la ecuación 15, resulta lo siguiente:

$$\ln \frac{\left(\frac{\hat{k}_1}{\hat{\lambda}_1^{\hat{k}_1}}\right)^N \prod_{i=0}^{N-1} \left[\Omega_{0,i}^{\hat{k}_1-1} \exp\left(-\left(\frac{\sum_{i=0}^{N-1} \Omega_{0,i}}{\hat{\lambda}_1}\right)^{\hat{k}_1}\right) \right]}{\left(\frac{k_0}{\lambda_0^{k_0}}\right)^N \prod_{i=0}^{N-1} \left[\Omega_{0,i}^{k_0-1} \exp\left(-\left(\frac{\sum_{i=0}^{N-1} \Omega_{0,i}}{\lambda_0}\right)^{k_0}\right) \right]} > \gamma \quad 13$$

Simplificando la ecuación anterior, queda:

$$N \ln \left(\frac{\hat{k}_1 \lambda_0^{k_0}}{k_0 \hat{\lambda}_1^{\hat{k}_1}} \right) + (\hat{k}_1 - k_0) \sum_{i=0}^{N-1} \ln(\Omega_{0,i}) - \left(\frac{\sum_{i=0}^{N-1} \Omega_{0,i}}{\hat{\lambda}_1} \right)^{\hat{k}_1} + \left(\frac{\sum_{i=0}^{N-1} \Omega_{0,i}}{\lambda_0} \right)^{k_0} > \gamma' \quad 14$$

El umbral propuesto, $\gamma' = \ln(\gamma)$, se ha tomado esta decisión para poder maximizar la probabilidad de detección, siguiendo el teorema de Neyman-Pearson (Kay, 1993):

$$P_{FA} = \int_{(\Omega_0: L_G(\Omega_0) > \gamma')} \mathcal{W}(\Omega_0; \theta_0, H_0) dx \quad 15$$

Donde, P_{FA} será considerada como la probabilidad de que se produzcan falsas alarmas.

El detector estará preparado para generar una alarma solo cuando se cumpla la condición de riesgo. Para hacer a la tripulación más consciente sobre la condición en la que se encuentra su buque, en lo referente a su estabilidad, el diseño del sistema será lo suficientemente intuitivo.

De este modo, ser capaz de informar al patrón sobre cuánto puede apurar y saber en qué medida se encuentra próximo o no al estado crítico del barco, de este modo se espera que le ayude a tomar las decisiones correspondientes para corregir un posible peligro. El sistema comparará la estimación estricta real de la frecuencia natural de balance, $\hat{\lambda}_1(\ln 2)^{\frac{1}{k_1}}$, con la frecuencia w_{0c} que expresa la situación de criticidad.

A continuación, para determinar el margen de estabilidad del buque se establecerán una serie de umbrales. De este modo se sigue con la prioridad de optimizar la información que recibirá el patrón, mediante un código de colores se informará en caso de ser verde oscuro, una situación segura, a un color rojo, como consecuencia de una condición insegura (Santiago Caamaño, 2019).

Estos colores se han relacionado a cada situación mediante la siguiente definición:

$$\begin{aligned} \frac{\hat{\lambda}_1(\ln(2))^{1/\hat{k}_1}}{w_{0c}} &\geq 1,3; \text{ Caso Verde Oscuro} \\ 1,3 > \frac{\hat{\lambda}_1(\ln(2))^{1/\hat{k}_1}}{w_{0c}} &\geq 1,1; \text{ Caso Verde} \\ 1,1 > \frac{\hat{\lambda}_1(\ln(2))^{1/\hat{k}_1}}{w_{0c}} &\geq 1,05; \text{ Caso Amarillo} \\ 1,05 > \frac{\hat{\lambda}_1(\ln(2))^{1/\hat{k}_1}}{w_{0c}} &\geq 1; \text{ Caso Naranja} \\ 1 > \frac{\hat{\lambda}_1(\ln(2))^{1/\hat{k}_1}}{w_{0c}} &; \text{ Caso Rojo} \end{aligned}$$

4.5 FILTRADO

Cuando se dé el caso de que la frecuencia de encuentro de la ola sea significativamente mayor o menor que la frecuencia natural de balance, el estimador EMD-HHT se encontrará en serios problemas para lograr identificar w_0 a partir de los diferentes componentes de la señal de balance.

El componente con mayor cantidad de energía se corresponderá normalmente con la excitación de la ola, y el pico del espectro ubicado en la frecuencia de encuentro de la ola tiende a ocultar el resto de las componentes, incluida la frecuencia natural de balance. Este inconveniente se ha de tener muy en cuenta sobre todo cuando el movimiento de balance tenga poca amplitud.

En esta casuística, \hat{w}_0 se encuentra fuera del intervalo $[w_{0,min} w_{0,máx}]$ por tanto será poco probable considerar que se trate de una estimación correcta de la frecuencia natural de balance. Con el objetivo de eliminar la probabilidad de que la frecuencia de encuentro enmascare a la frecuencia natural de balance, se aplicará un filtro de paso de banda.

El filtro es un Chebychev Tipo II de quinto orden con una atenuación en la banda de parada de 20 dB, una frecuencia de corte inferior de 0.3 rad/s y corte superior de 0,95 rad/s. Estos valores coinciden con $w_{0,min}$ y una elección conservadora de $w_{0,máx}$ (Santiago Caamaño, Galeazzi, et al., 2019).

5 CARACTERÍSTICAS DEL CANAL

Los ensayos para este estudio, como se mencionó anteriormente, se realizaron en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de la UDC, en el Centro de Investigaciones Tecnológicas del campus de Esteiro, Ferrol. En el aspecto técnico, el canal tiene unas dimensiones de 56 metros de longitud, 4.2 metros de ancho y 1.8 metros de profundidad.

El generador de olas consta de una pala transversal al canal, que lo abarca en su totalidad, operada por un motor eléctrico que a su vez está conectado a un controlador para que el usuario envíe la orden que precise. Además, consta con una serie de galgas con las que medir la altura a la que se encuentra el nivel del agua para generar las olas correctamente, en este estudio normalmente se mantenía el nivel a 180 cm de altura.

Ilustración 8: Canal de experiencias



Por otro lado, se tienen las playas, son elementos que se encuentran al principio del canal, es decir detrás de la pala, y al final del canal, su objetivo es disipar la energía de las olas provocando que rompan. Ambas son estructuras metálicas con un revestimiento

en la parte de la superficie por un material poroso que se encarga de dejar pasar el agua, pero absorbiendo parte de ella.

Finalmente, se tienen los controladores y ordenadores, sus funciones principales consisten en procesar la información y enviársela a la pala, y a su vez mostrar el seguimiento del proceso en la pantalla para su correcta visualización.

Antes de realizar cualquier prueba en el canal de experiencias, es importante considerar las limitaciones de las olas que se van a generar. En este caso las olas serán regulares, identificándolas con una altura y un periodo dado, porque estos son los valores que nos pide el programa.

A la hora de comenzar un conjunto de ensayos en el canal con el buque modelo, se realizaron pruebas de calibración del canal, para así disminuir el error que se pueda producir por el generador de olas. En primer lugar, se ajustaba la profundidad del agua llenando el canal hasta los 180 centímetros, debido a que esta era la altura recomendada para llevar a cabo los ensayos. Seguidamente, se encendían los ordenadores y controladores del generador de olas y de la pala. Cuando el agua se encontraba en calma se realizaba un self-test para así calibrar el generador de olas, una vez finalizada se actualizaban los coeficientes de calibración en caso de ser necesario y luego se generan una serie de olas para así mover el agua del canal para eliminar la estratificación en el agua producida por el tiempo.

Este proceso diario llevaba aproximadamente 1 hora y 30 minutos, consecuencia principalmente de la espera hasta que se calmase el canal. Se activaba el modo absorber de la pala, para disminuir el rebote de las olas y amortiguarlas. El tiempo que tardaba de este modo en calmarse el agua rondaba los 30 minutos generalmente como precaución. El problema es que ciertas olas no eran capaces de amortiguarse como se ha descrito y llevaba más tiempo de espera. Cuando la tarea de calibración diaria se completaba se daba comienzo a los ensayos.

Inicialmente, se realizaba la puesta a punto del modelo, normalmente esto se llevaba a cabo mientras el canal entraba en remanso. Luego, se preparan e ingresan los datos correspondientes en el ordenador para generar la ola que se desea estudiar, simultáneamente preparamos el ordenador que se encarga de la recogida de datos del sensor del modelo. Seguidamente, se inicia la grabación del sensor para la recogida de datos y a continuación se ejecuta el programa de la pala para iniciar la generación de las olas. Al iniciar la grabación antes de iniciar el canal posteriormente se tendrá que eliminar las 3 primeras series recogidas del sensor porque no suelen estar completamente desarrolladas.

La grabación del ensayo de inicio a fin se realizó durante 3 minutos, requerimiento fundamental para el método que se está estudiando, esto permitía ver como reaccionaba el modelo cuando el rebote de la ola en la playa volvía, produciendo olas cruzadas. Una vez finalizado y parado el generador, se repetía el proceso de absorción de la ola para dejar nuevamente el canal en calma para la siguiente prueba, proceso que se repetía hasta finalizar la tanda de pruebas diaria.

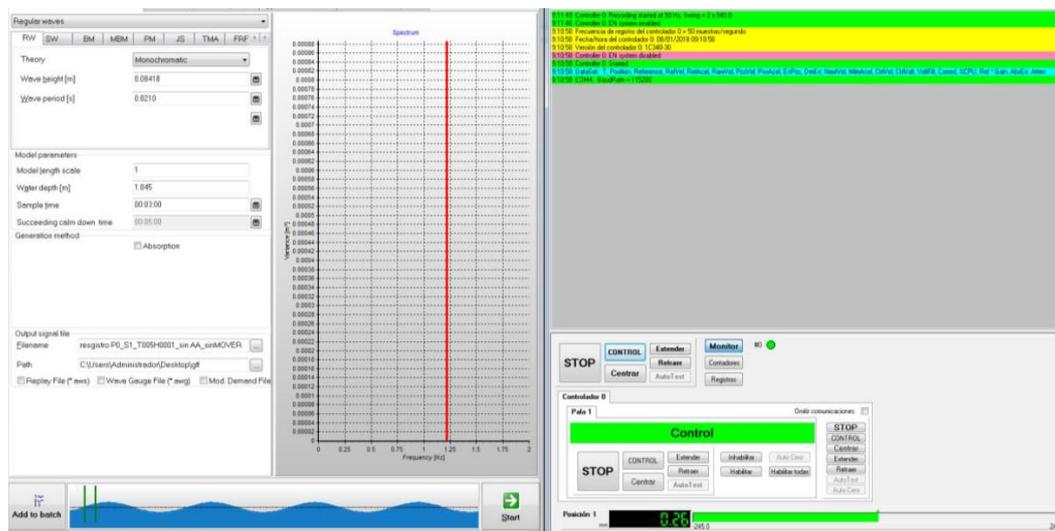
6 INSTRUMENTACIÓN

Durante la realización de los ensayos, se emplearon una serie de instrumentos para la correcta realización de las pruebas. Como son las herramientas básicas para la puesta a punto y mantenimiento del modelo, como son el caso de destornilladores, pesos, pistola de silicona, etc. Como también la grúa, para poder desplazar y situar con seguridad el modelo en el canal. Por otro lado, se han empleado los siguientes instrumentos más específicos que se explicarán en detalle a continuación.

6.1 PROGRAMAS

En los ensayos se han utilizado dos programas, uno para generar las olas deseadas y el segundo para la toma de datos y manipulación de estos. El generador de olas es un programa cuya función consiste en dar la capacidad de elegir el tipo de ola que se quiera estudiar, introduciendo los parámetros que se consideren, y seguidamente se encarga de enviar estos datos al generador de olas que se encarga del funcionamiento de la pala.

Ilustración 9: Programa del generador de olas

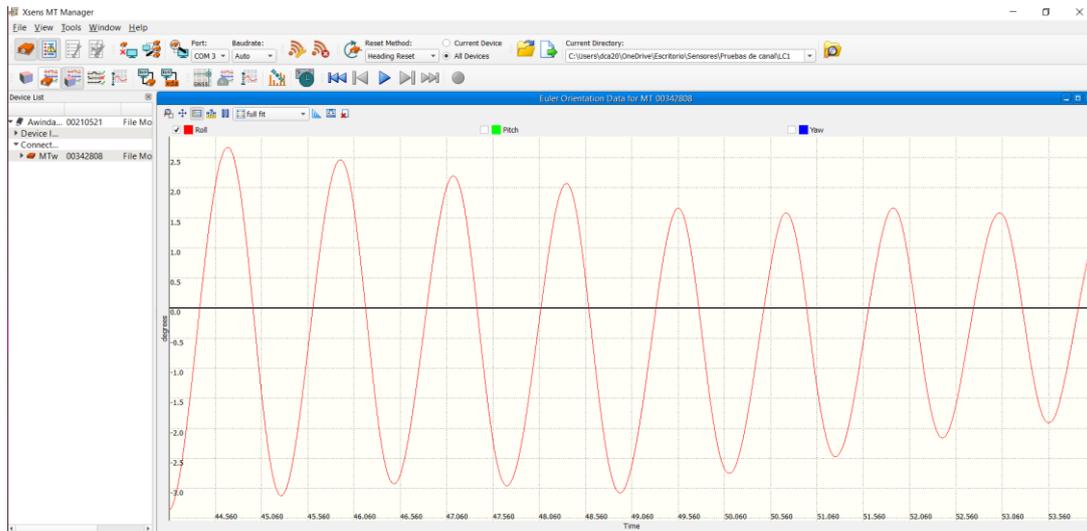


El programa que se encarga de adquirir los datos es el XSens MT Manager, estos datos se obtendrán con la ayuda de la IMU. Con esta herramienta se podrá habilitar y deshabilitar la IMU y realizar grabaciones para luego exportarlas y traducirlas en resultados.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL BUQUE.

DAVID CASTELLANO ACOSTA.

Ilustración 10: Programa MT Manager (Xsens, 2021)



6.2 SENSORES

El sensor con el que se ha trabajado es el Inertial Measurement Unit (IMU), se trata de un dispositivo inalámbrico que en su interior incorpora un acelerómetro 3D, un giroscopio 3D, un magnetómetro 3D y un barómetro. Con todo esto y sumando su algoritmo es capaz de proporcionar una orientación en tres dimensiones muy eficiente.

Ilustración 11: Sensor IMU (Xsens, 2021)



Como todo dispositivo inalámbrico, tiene una duración de batería limitada esto se traduce a unos 3 ensayos por sensor, si no se produce ningún inconveniente durante el proceso, aproximadamente 2 horas de trabajo útil. Por este motivo, se han empleado dos sensores de forma alterna, mientras uno se encontraba operando, el otro se estaba cargando. El dispositivo se comunica con el ordenador y correspondiente programa con la ayuda de un dispositivo USB.

7 BUQUE BASE Y MODELO A ESCALA

El buque con el que se ha trabajado en este estudio es un arrastrero de popa, de tamaño medio, es un barco típico en la flota pesquera española, suelen operar por la zona del Gran Sol en Irlanda del Sur. Se caracterizan por ser buques que tienen una rampa en popa y su puente de mando se encuentra ubicado próximo a la proa.

Este tipo de buques se fundamenta en la pesca de arrastre, que consiste en emplear una red lastrada, que barre el fondo marino y de este modo captura todo lo que se va encontrando a su paso. Se considera pesca activa porque no consiste en esperar ni confiar en los movimientos del pez para ser capturado. Pero es uno de los tipos de pesca más cuestionados y por ello se exige una mayor regulación.

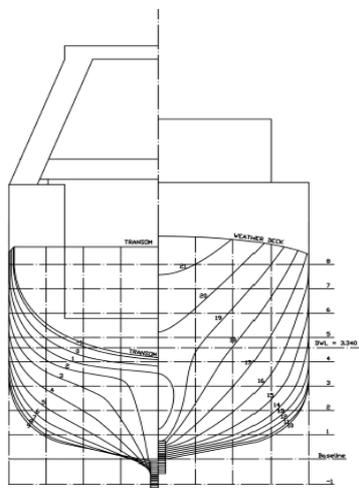
Principalmente se ha seleccionado este tipo de buque porque se tiene un modelo a escala en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de la Escuela Politécnica de Ferrol, y gracias a esto se han podido realizar los ensayos pertinentes para poder comprobar la validez del método que es objeto de estudio. En la siguiente tabla se mostrarán sus principales dimensiones, características y condición de carga.

Tabla 1: Dimensiones principales

Eslora total (m)	34,50
Manga (m)	8,00
Calado (m)	3,34
Puntal (m)	3,65
Desplazamiento (t)	448
Altura metacéntrica (m)	0,350

A continuación, se podrá ver una imagen ilustrativa de la caja de cuadernas correspondiente.

Ilustración 12: Caja de cuadernas (Santiago Caamaño, 2019)



En este estudio se someterá al buque a diferentes condiciones de ola, tanto capaces de generar resonancia como de no producirla, se tratarán olas transversales sobre el barco a velocidad nula produciendo de esta forma el movimiento de balance, que podría entrar en resonancia cuando las frecuencias de las olas producidas por la excitación se vayan acercando o se acerquen a la frecuencia natural del buque.

El modelo con el que se ha trabajado está escalado en referencia al buque base descrito anteriormente. La escala del modelo es 1:30 resultando las siguientes dimensiones:

Ilustración 13: Buque modelo



Tabla 2: Dimensiones modelo

Eslora total (m)	1.150
Manga (m)	0.267
Calado (m)	0.113
Puntal (m)	0.122
Desplazamiento (kg)	16.593
Altura metacéntrica (m)	0.0117

Está fabricado con poliuretano de alta densidad, pintado amarillo exteriormente y su interior se reforzó con fibra de vidrio. Cabe destacar, que tiene implementado un sistema para dotarlo de autopropulsión, pero que para esta práctica es irrelevante porque los ensayos de este estudio serán a velocidad cero. Si es práctico hacer referencia a los pesos, debido a que tiene una serie de pesos para obtener las condiciones de carga adecuadas, algunos de estos se han ajustado gracias a su capacidad de modificación para adecuarlos a lo que se necesitaba para las correspondientes condiciones de carga. A mayores, el modelo cuenta con un espacio donde se coloca el correspondiente sensor, que es el encargado de recabar la información de las pruebas realizadas.

Ilustración 14: Cubierta del modelo y ubicación del sensor

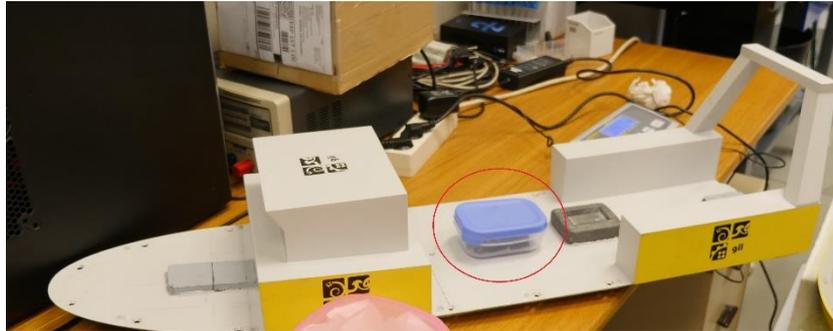


Ilustración 15: Interior del modelo



7.1 DESCRIPCIÓN DE CONDICIONES DE CARGA

Estas embarcaciones suelen tener dos etapas de funcionamiento diferenciadas. La primera consiste en navegar entre caladeros a velocidades, normalmente, moderadas. Y la segunda etapa se corresponde con las maniobras de pesca. La más conflictiva suele ser la segunda etapa porque el buque navega a una velocidad de avance muy baja, muy próxima a cero, además de una capacidad reducida de mantener el rumbo. Esto puede provocar que el buque se encuentre con olas de costado, que, sumado a la posible resonancia de balance, momentos bajos de amortiguación, ciertas escotillas abiertas y pesos colgantes, podrían significar una posible inundación y/o zozobra.

Las experiencias se fundamentarán en dos condiciones de carga, LC1 y LC2, siendo estas las condiciones con las que poder probar la capacidad del detector para identificar los posibles cambios que se produzcan en la estabilidad del buque. La condición de carga 1 (LC1) representa la condición crítica del buque, teniendo un $GM = 0.350 m$. Por otro lado, la condición de carga 2 (LC2) representará una condición segura, debido a que su GM se encuentra por encima del valor mínimo requerido para buques de pesca como se ha indicado anteriormente.

Tabla 3: Condiciones de Carga

Condición de carga	REAL		MODEL	
	LC 1	LC 2	LC 1	LC 2
Desplazamiento (t)	448	489	0,016593	0,018111
Calado (m)	3,340	3,484	0,111	0,116
Altura metacéntrica (m)	0,350	0,501	0,012	0,017
Frecuencia natural de balance (rad/s)	0,563	0,701	3,084	3,840
Periodo natural de balance (s)	11,160	8,963	2,038	1,636
k_{xx}	0,411	0,395		

8 ENSAYOS EXPERIMENTALES

8.1 PRUEBA DE ESTABILIDAD

Se trata de un ensayo de aplicación a buques de pasaje, buques de carga de esloras superiores a 24 metros y a buques de guerra, entre otros, además de realizarse en buques de estudio, es decir, buques modelos como es el caso. En cuanto a esta prueba a ligeras excepciones, como los buques de serie, gemelos o análogos.

Este ensayo ayuda a determinar las características del centro de gravedad del modelo, lo que se traduce a conocer dichas características del buque real. Al realizar la prueba se obtendrán valores exactos de las alturas de centro de gravedad. Dicho proceso se realizó con el modelo descrito anteriormente en el canal de experiencias mencionado. El modelo se encontrará en un estado de reposo, con un trimado de 0 y a una escora mínima.

Ilustración 16: Disposición del modelo para la prueba de estabilidad



Para el desarrollo de la prueba fueron necesarios una serie de pesos, de dimensiones y masa conocida, y de un sensor IMU para determinar la escora del buque necesaria para concluir el ensayo. Se consideró el peso del dispositivo despreciable en este estudio.

Una vez colocado el sensor en el modelo, previamente, se colocó el buque en el canal y se esperó hasta que estuviese en completo reposo. Luego, con la ayuda de los pesos correspondientes, inicialmente ubicados en la línea de crujía para medir la condición de equilibrio en la que se comienza, importante aclarar que estos pesos no contribuirán al brazo escorante porque el modelo se encuentra en equilibrio y es simétrico.

Se obtenía una cierta escora, que se compensará posteriormente. Se han desplazado entre babor o estribor, hasta una determinada distancia, hasta obtener un valor de escora lo más cercano a 0, para así compensar la inclinación inicial. Obteniendo las siguientes distancias desplazadas a babor y estribor, con sus ángulos de escora, para las respectivas condiciones de carga:

Tabla 4: Distancias desplazamiento de pesos y escoras

Condición de carga	LC1	LC2
Distancia Desplazamiento de pesos babor (m)	0.085	0.085
Distancia Desplazamiento de pesos estribor (m)	0.085	0.085
Ángulo de escora babor (grados)	5.25	3.2
Ángulo de escora estribor (grados)	5.25	3.2

Una vez verificados los pesos que se han añadido y su respectiva distancia de desplazamiento válida, se calcula el desplazamiento real del modelo más los pesos. Además, mediante las hidrostáticas se obtendrán los KM del modelo tanto con pesos como sin ellos, y el KG de pesos móviles, estos últimos al basarse en las hidrostáticas del modelo serán iguales en ambas condiciones de carga.

Tabla 5: Desplazamientos, KM y KG

Condición de carga	LC1	LC2
Desplazamiento real modelo + pesos (kg)	16.87	18.25
KM modelo desplazamiento real + pesos (m)	0.1358	
KM modelo desplazamiento real (m)	0.1355	
KG pesos móviles (LB) (m)	0.2189	

En lo referente al valor del GM se relacionarán los centros de gravedad del peso empleado y del modelo con la tangente de los ángulos de escora, dependerá directamente de la distancia a la que se encuentre el peso, con la ayuda de la siguiente formula se podrá obtener.

$$GM_{exp} = \frac{P \cdot d}{\Delta_{exp} \cdot \tan(\phi)}$$

Una vez obtenido el valor del GM del modelo con los pesos, se calculará el KG del modelo con pesos, y luego el KG respectivo del modelo sin los pesos. Y finalmente, se calculará el GM modelo sin pesos para obtener el GM real, que será el anterior por el factor de escala. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 6: KG y GM

Condición de carga	LC1	LC2
GM modelo con pesos	0.0110	0.0167
KG modelo con pesos	0.1249	0.1192
KG modelo sin pesos	0.1237	0.1181
GM modelo sin pesos	0.0118	0.0174
GM Real	0.3528	0.5230

8.2 ENSAYO DE DECAIMIENTO

La prueba de decaimiento se realiza con el objetivo de obtener el periodo de balance y, por tanto, la frecuencia natural del buque. La realización de la experiencia es relativamente sencilla, una vez dispuesto el modelo en el canal en posición perpendicular al canal de experiencia, con el sistema de captación de datos (el sensor IMU) previamente colocado en el modelo, se dio comienzo al ensayo. Se excitaba uno de los extremos del buque, para que oscilase de forma libre en el canal hasta que el movimiento se amortiguase en su totalidad.

Al generar esta escora y dejarlo oscilar libremente, el sensor captará principalmente el movimiento correspondiente al balance. Fue fundamental no aplicar movimiento de cabeceo porque podría haber afectado considerablemente la oscilación de balance. Esto se repitió una serie de veces para obtener suficientes muestras significativas en caso de que alguna resultase errónea.

Con la ayuda del software Xsens MT Manager, descrito anteriormente, y tras procesar los datos con Matlab se obtendrá como resultado las siguientes gráficas representativas:

Ilustración 17: Ensayo 1 LC1

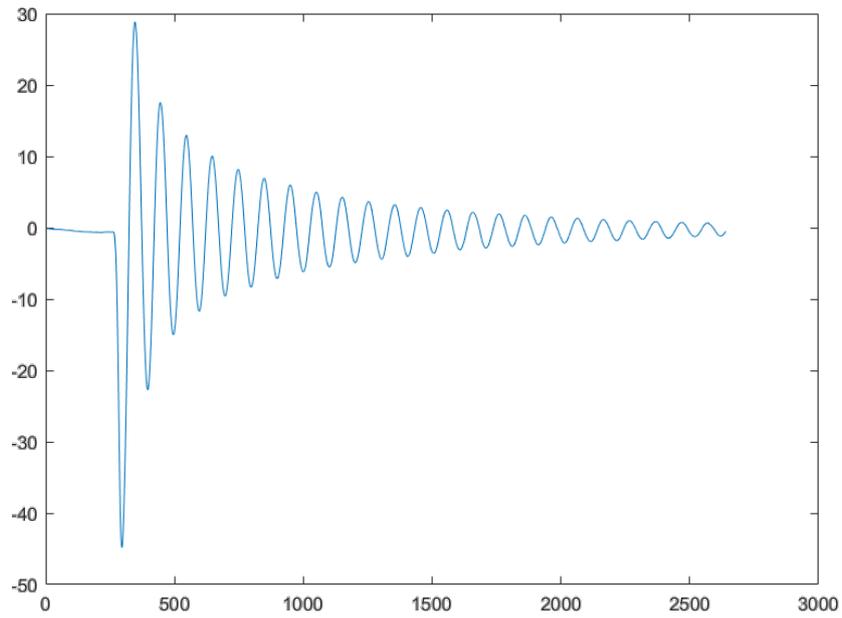


Ilustración 18: Ensayo 2 LC1

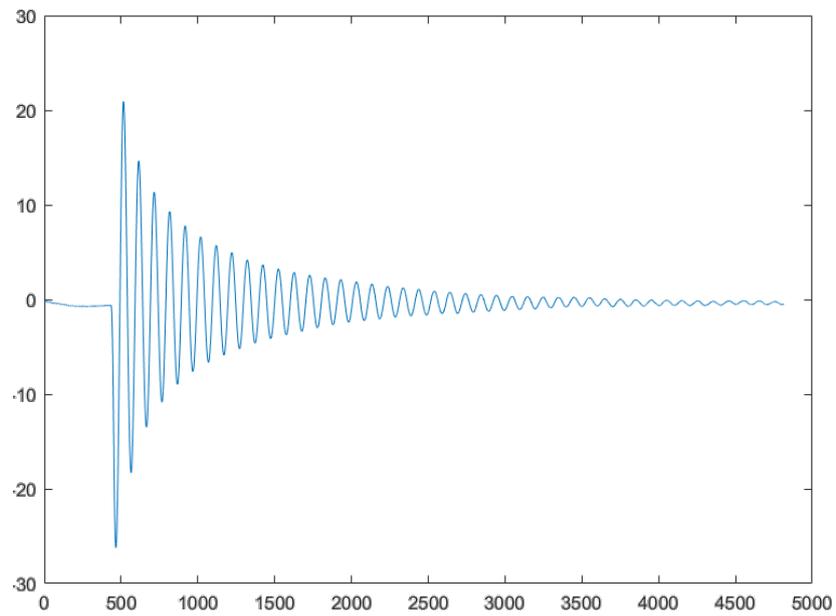


Ilustración 19: Ensayo 4 LC1

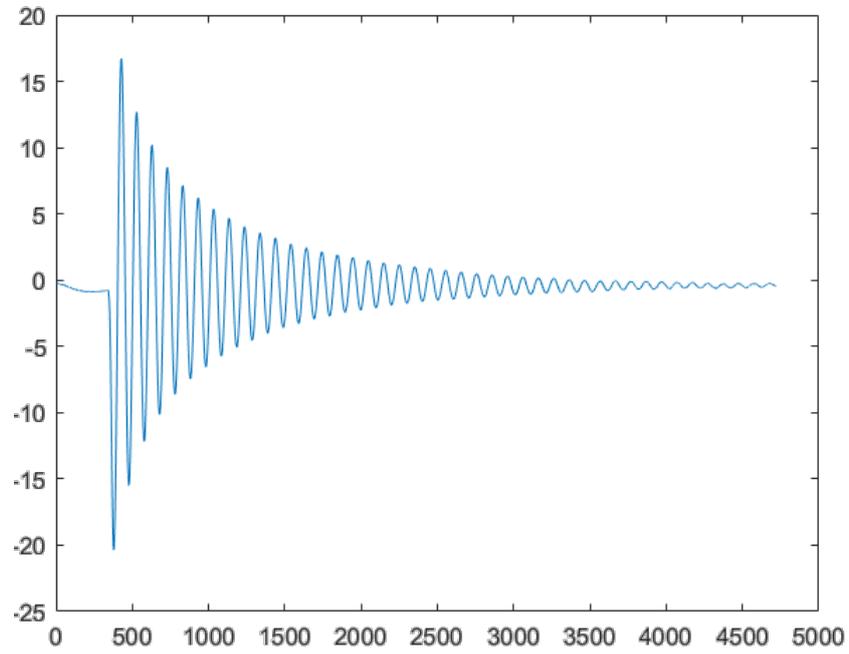


Ilustración 20: Ensayo 6 LC1

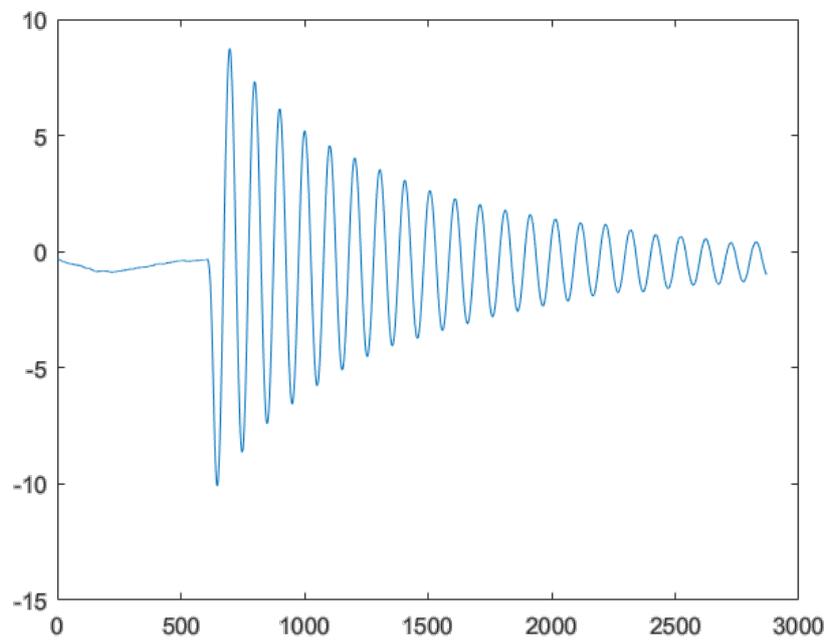


Ilustración 21: Ensayo 8 LC1

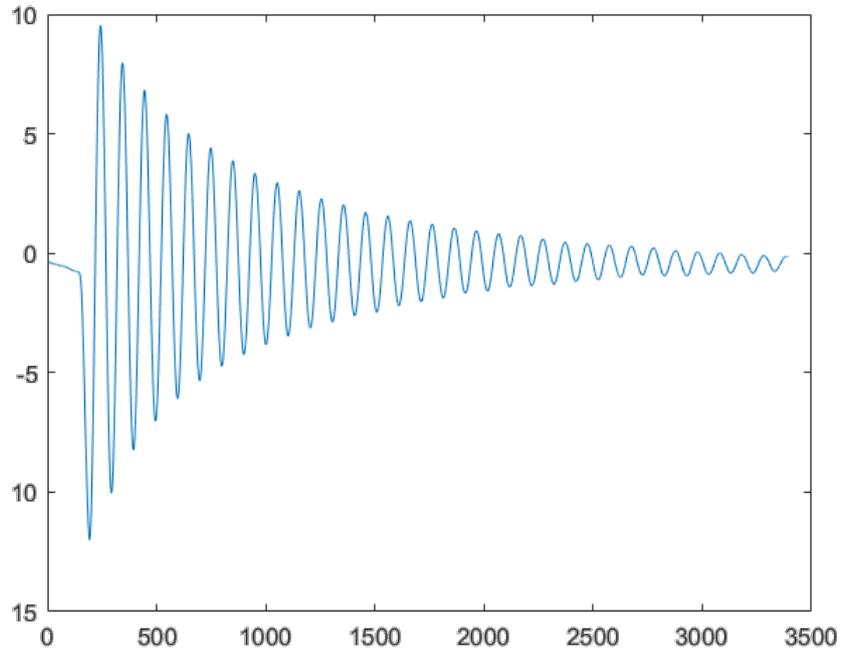


Ilustración 22: Ensayo 2 LC2

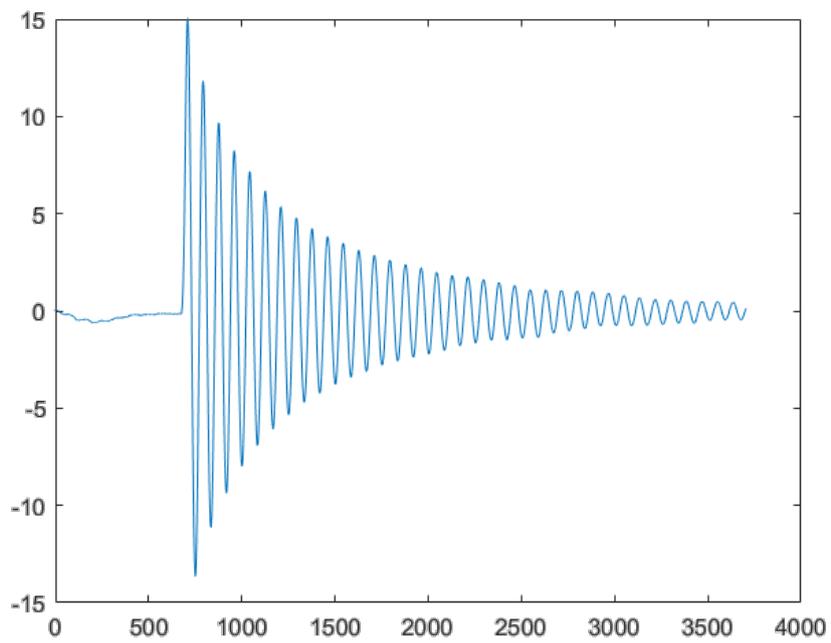


Ilustración 23: Ensayo 3 LC2

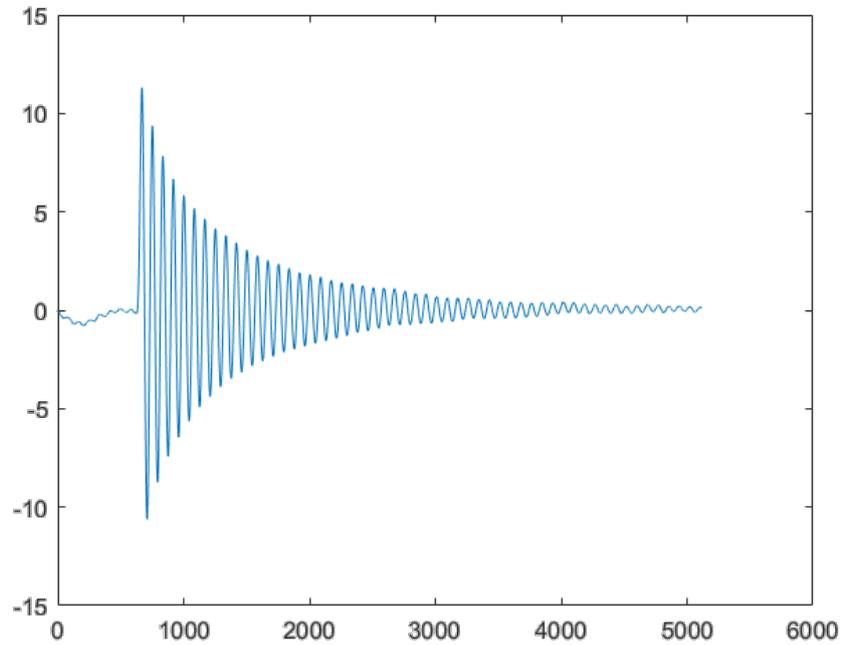
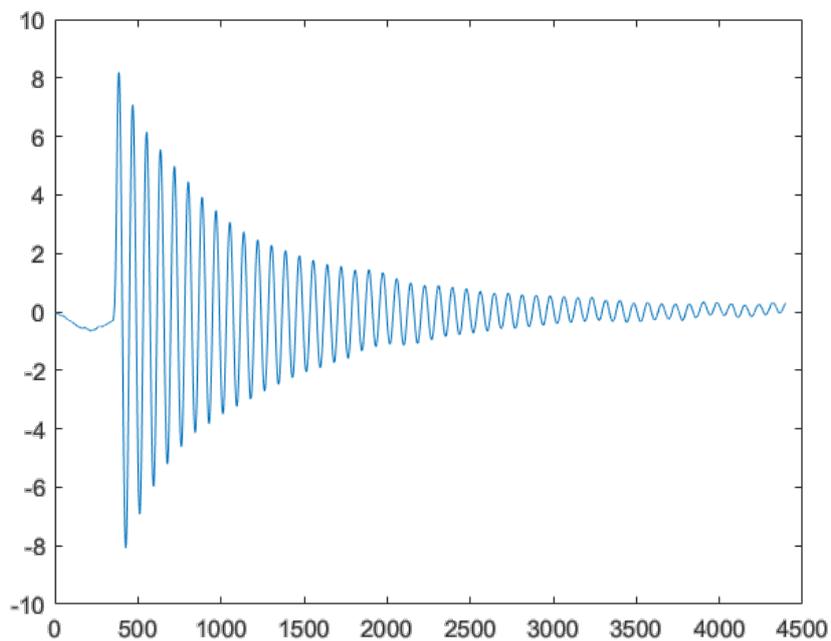


Ilustración 24: Ensayo 4 LC2



Se pueden apreciar las fases que se han producido en la prueba. La línea oscilante se corresponde al ángulo de escora que se va produciendo en cada instante de tiempo. Inicialmente se produce una gran perturbación en la escora, esto se debe a la primera excitación que se le aplica al modelo. Con el tiempo comenzará a oscilar y al mismo tiempo a amortiguarse. Es importante destacar que la frecuencia de muestreo que se ha utilizado ha sido de 50 Hz.

Lo que se busca obtener serán los máximos y los mínimos, y además el tiempo que le corresponde a cada uno de estos ensayos. Para ello, se empleará la función $f_findextr$ (Bulian & Francescutto, 2004), esta función se encarga de devolver una serie de parámetros entre los cuales se encuentra el valor máximo de un vector dado, en este caso particular se trata de la escora, para cada una de las frecuencias, en cada una de sus pendientes.

Con los tiempos entre cada uno de los máximos, o con cada uno de los mínimos, se obtendrá el periodo natural de muestra del modelo y, por tanto, su frecuencia natural. Se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 7: Valores de Periodo

LC1		LC2	
Tmodelo (s)	2,0219	Tmodelo (s)	1,6756
Treal (s)	11,0744	Treal (s)	9,1776

Una vez obtenido el periodo se podrá calcular la frecuencia natural del modelo, mediante la siguiente formula:

$$w_0 = \frac{2\pi}{T_0}$$

17

Resultando el siguiente valor de frecuencia:

Tabla 8: Valores de la frecuencia natural

LC1		LC2	
Frecuencia natural modelo (rad/s)	3,1076	Frecuencia Natural modelo (rad/s)	3,7498
Frecuencia natural real (rad/s)	0,5674	Frecuencia natural real (rad/s)	0,6846

9 ENSAYOS DE CANAL

Una vez realizados las pruebas anteriores con el modelo para las condiciones de carga propuestas para este estudio, se comenzó con los ensayos en el canal de experiencias, ya referenciado anteriormente, modelando los diferentes tipos de olas para poner a prueba el comportamiento del buque ante las diferentes condiciones que se generan en consecuencia.

Las condiciones se han escalado para que los resultados de las reacciones del modelo sean los más fieles posibles a la realidad, es decir, que se asemejen a lo que podría sucederle al buque en alta mar. Para escalar los valores de las olas, se han realizado las siguientes operaciones para la frecuencia y la altura de ola:

$$\omega_{modelo} = \omega \cdot \sqrt{30}$$

18

$$H_{modelo} = \frac{H}{30}$$

19

9.1 PREPARACIÓN DEL CANAL

Una vez realizadas las operaciones de calibración pertinentes del canal explicadas anteriormente, se procedió a ubicar el modelo en la zona aproximadamente central del canal, más cercano a la pala que a la playa de costa, perpendicular a este. Se fijó mediante una serie de cabos a los raíles de las paredes laterales para así evitar la deriva del buque modelo, pero ligeramente holgadas para que no se generasen tirones durante el ensayo y de este modo lograr que no afectase en la toma de datos.

Ilustración 25: Modelo dispuesto para los ensayos



A continuación, se dio comienzo con los ensayos de canal, introduciendo los parámetros de periodo y altura de ola en el software de la pala. Estos valores se han establecido en el momento en el que se elige la frecuencia y pendiente de la ola.

9.2 DESCRIPCIÓN DE LAS OLAS

Para validar el sistema de control de estabilidad y considerando las limitaciones del canal de experiencias en cuanto a los tipos de ola que puede generar, se generarán olas regulares, impactando por el costado del modelo, que se identificarán por una altura y periodo concreto, porque son los valores que se pueden introducir en el software del generador de olas.

La orientación del modelo con los costados del buque mirando al generador de olas, se dispuso para que las olas se encontrasen con el costado. Se realizó a velocidad nula, por tanto, la frecuencia de encuentro de las olas con el modelo será igual a la indicada en la pala. Entonces, dependiendo del ensayo el modelo puede reaccionar de dos formas diferentes:

1. Que se encuentre en una frecuencia en la que no se llegue a producir resonancia, por lo que la escora se irá amortiguando.
2. Que se encuentre con una frecuencia que le genere resonancia, por tanto, el buque no será capaz de disipar el movimiento, y en ciertas ocasiones podría verse incrementado el balance producido, dando un evidente efecto de resonancia.

9.3 MATRIZ DE ENSAYO

Es importante destacar, antes de continuar, lo explicado en el apartado 5.1 y es que cada ola se ha ensayado cuatro veces porque para considerar un ensayo en tiempo real se requiere de una toma de datos de una ventana de tres minutos, con una superposición entre la toma de valores del 75% aumentando el número de estimaciones, y a su vez dando como resultado una estimación cada 45 segundos. Los ensayos que se realizaron figuran detalladamente en la siguiente matriz de ensayo:

Tabla 9: Matriz de ensayo

Number	REAL				MODEL		
	LC	Hw (m)	Tw (s)	ω_e (rad/s)	Hw (m)	Tw (s)	ω_e (rad/s)
1	LC 1	3	6,573	0,956	0,10	1,2	5,236
2	LC 1	3	6,573	0,956	0,10	1,2	5,236
3	LC 1	3	6,573	0,956	0,10	1,2	5,236
4	LC 1	3	6,573	0,956	0,10	1,2	5,236
5	LC 1	3	8,764	0,717	0,10	1,6	3,927
6	LC 1	3	8,764	0,717	0,10	1,6	3,927
7	LC 1	3	8,764	0,717	0,10	1,6	3,927
8	LC 1	3	8,764	0,717	0,10	1,6	3,927
9	LC 1	3	10,954	0,574	0,10	2	3,142
10	LC 1	3	10,954	0,574	0,10	2	3,142
11	LC 1	3	10,954	0,574	0,10	2	3,142
12	LC 1	3	10,954	0,574	0,10	2	3,142
13	LC 1	3	13,145	0,478	0,10	2,4	2,618
14	LC 1	3	13,145	0,478	0,10	2,4	2,618
15	LC 1	3	13,145	0,478	0,10	2,4	2,618
16	LC 1	3	13,145	0,478	0,10	2,4	2,618
17	LC 2	3	6,573	0,956	0,10	1,2	5,236
18	LC 2	3	6,573	0,956	0,10	1,2	5,236
19	LC 2	3	6,573	0,956	0,10	1,2	5,236
20	LC 2	3	6,573	0,956	0,10	1,2	5,236
21	LC 2	3	8,764	0,717	0,10	1,6	3,927
22	LC 2	3	8,764	0,717	0,10	1,6	3,927
23	LC 2	3	8,764	0,717	0,10	1,6	3,927
24	LC 2	3	8,764	0,717	0,10	1,6	3,927
25	LC 2	3	10,954	0,574	0,10	2	3,142
26	LC 2	3	10,954	0,574	0,10	2	3,142
27	LC 2	3	10,954	0,574	0,10	2	3,142
28	LC 2	3	10,954	0,574	0,10	2	3,142
29	LC 2	3	13,145	0,478	0,10	2,4	2,618
30	LC 2	3	13,145	0,478	0,10	2,4	2,618
31	LC 2	3	13,145	0,478	0,10	2,4	2,618
32	LC 2	3	13,145	0,478	0,10	2,4	2,618

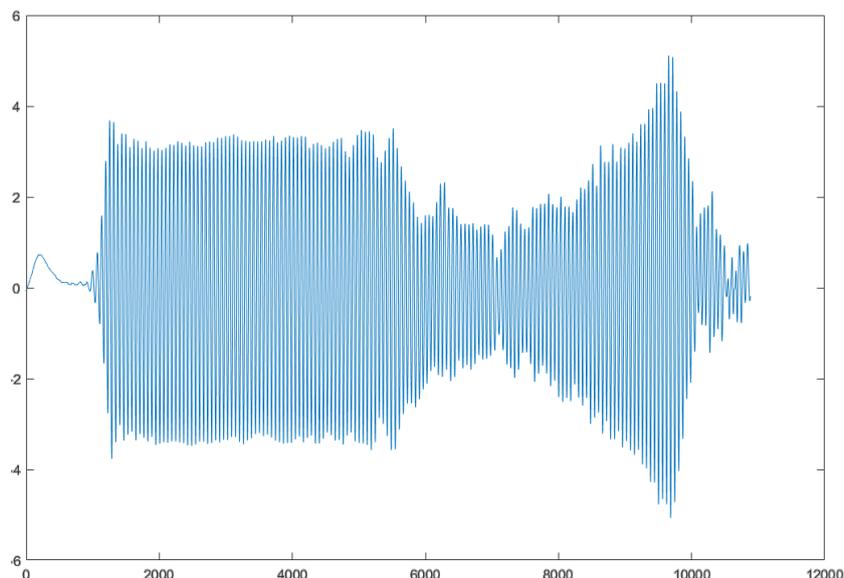
Una vez introducidos los valores correspondientes a generar por la pala, se procedió con la recogida de datos en el portátil con el software indicado anteriormente. El procesamiento de los datos posterior se realizó con la ayuda de la herramienta Matlab.

La frecuencia que se introdujo en el software de recogida de datos fue de 50 Hz, este detalle es fundamental porque emplear una frecuencia demasiado alta provocaría pérdida de datos, en contraparte una frecuencia significativamente pequeña podría no simular correctamente los movimientos que se producen en el buque. Por estos motivos normalmente en ensayos de este estilo se emplea la frecuencia de 50 Hz.

9.4 PROCESADO DE DATOS

En el siguiente ejemplo gráfico, de un ensayo de canal, se puede ver como se reproduce el movimiento de balance con el impacto de las olas durante todo el ensayo.

Ilustración 26: Ejemplo ensayo de canal (Ensayo 4 LC1)



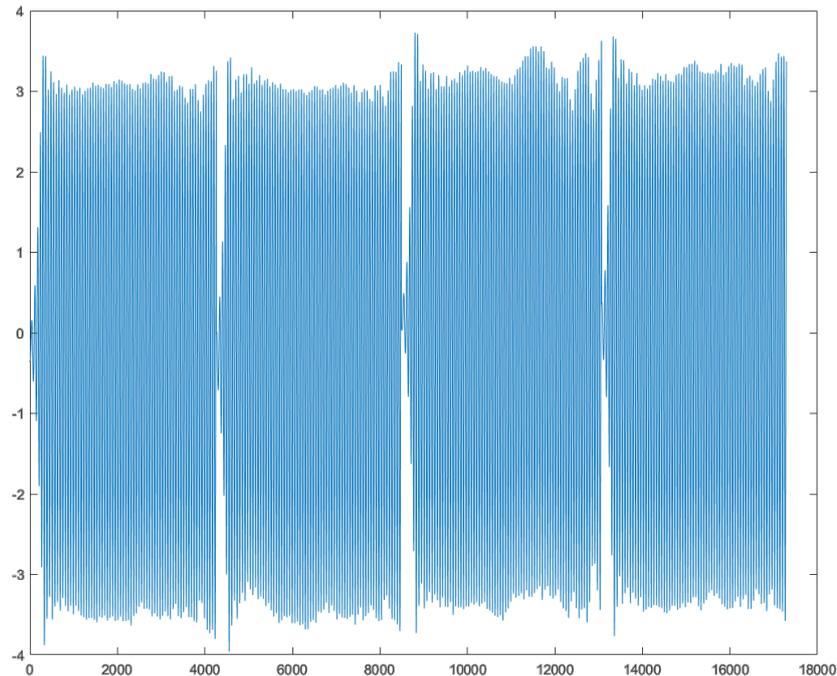
Se pueden observar varias etapas del ensayo. Inicialmente, antes de que tome contacto con la primera ola se puede apreciar una leve escora, de la cual el buque se recupera antes de la toma de contacto. Luego, en este caso tras la primera ola se puede ver el gran incremento que se produce debido a la excitación de este tipo de ola.

El buque se mantiene con un balance de 4 grados, estable, y sin problemas de embarque de agua o de posibles problemas de resonancia. Cuando comienza a recibir el rebote de la ola que proviene de la playa, en el momento en el cual el modelo recibe ambas olas (del generador y de la playa) empieza a excitarse de forma anómala y con grandes variaciones en cuanto a amplitud de balance, perdiendo un poco el control, pero sin llegar a tener grandes inconvenientes. Pero en este estudio lo importante y lo que se estudiará será la etapa en la cual el buque solo recibe la ola generada, y no se tendrá en cuenta el rebote. Por tanto, se seleccionará solo esa parte de la serie temporal.

Se realizaron un total de 32 ensayos, divididos en dos condiciones de carga y a su vez en 4 tipos de ola diferentes. Cada tipo de ola de cada condición de carga se ensayó 4

veces porque el sistema que se está probando requiere que la toma de datos sea lo suficientemente larga para poder hacer las estimaciones y compararlas. Pero debido a las dimensiones del canal, la duración de la serie de balance recortando las partes transitorias no alcanzaba el mínimo necesario. Por este motivo, se realizan los 4 ensayos correspondientes y luego al tratar las series temporales de movimiento de balance se han recortado las partes transitorias y unido quedando gráficas como la que se muestra en el ejemplo siguiente:

Ilustración 27: Primera serie de 4 ensayos LC1



Con estos datos ya se podrá comenzar con el análisis de los resultados, el cual consistirá en comprobar si el detector cumple con la función teórica demostrada (Santiago Caamaño, 2019) esta vez con datos prácticos. El detector leerá los resultados de los ensayos de ambas condiciones de carga y de misma ola de estudio y se verá, y comentará, si cuando no debe saltar la alarma esta no salte y viceversa. Además, de analizar los valores pertinentes que se explicarán en el apartado siguiente.

10 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este punto para validar el sistema de estimación de la estabilidad que se ha propuesto, se han analizado y comparado las dos condiciones de carga descritas anteriormente en el [apartado 8.1](#). Además, se analizará como afecta el estado del mar en el momento de aplicar la metodología de estudio que se ha propuesto comparando los resultados que se han obtenido. El buque modelo es el que se a presentado en el [apartado 8](#), cuyas dimensiones y formas se muestran en sus correspondientes tablas e ilustraciones.

Es importante reiterar que el análisis se realizó a velocidad cero y con incidencia de las olas de costado, de este modo lo que se consigue es simular el peor escenario operativo posible para un buque pesquero. Por tanto, no se tendrán en consideración efectos dinámicos que se puedan producir, como podrían ser las redes de arrastre entre otros.

Las condiciones de mar que se emplearán son las siguientes:

Tabla 10: Condiciones de mar

Condición de mar	$H_w(m)$	$T_w(s)$	$w_e(rad/s)$
1	3	6.573	0.956
2	3	8.764	0.717
3	3	10.954	0.574
4	3	13.145	0.478

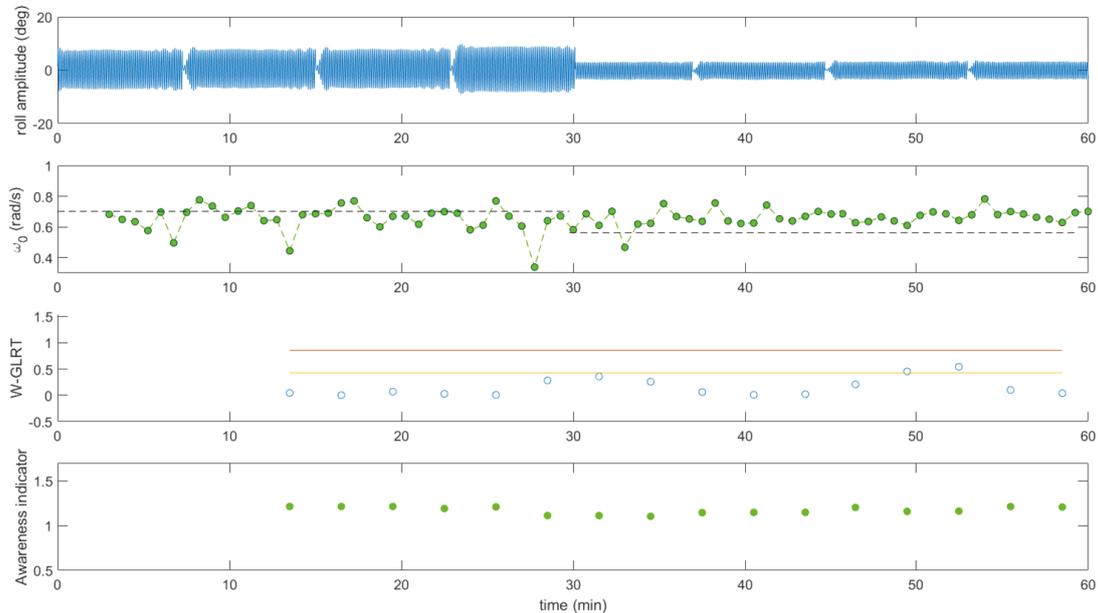
Las series temporales que se analizarán se componen de dos partes, donde la primera se corresponde con la condición de carga segura, que en este caso se trata de la condición de carga 2 (LC2). Y la segunda parte se corresponde con la condición de carga que tiene el nivel mínimo de estabilidad según la normativa.

A mayores, las series obtenidas de los ensayos se han procesado con un filtro de paso bajo con una frecuencia de corte de 1.75 rad/s, de este modo se consigue eliminar posibles componentes de la señal que no se encuentren relacionados como son el caso del rebote olas que se produce en el canal durante los ensayos, efectos de las paredes, etc. Por otro lado, se tiene w_c que se trata de la mayor frecuencia que se tiene en el libro de estabilidad, que es la correspondiente a la condición de carga con el GM más alto, en este caso $w_c = 0.829 rad/s$, esta frecuencia se aplica como filtro de paso de banda cuando se dé la condición de $w_e > w_c$. (Santiago Caamaño, Galeazzi, et al., 2019)

Ahora para explicar la influencia que tiene el impacto de la frecuencia de encuentro de las olas en el rendimiento de la estimación y detección, se explican a continuación en detalle las diferentes situaciones que se han estudiado. Donde se podrán distinguir cuatro gráficas representativas, las cuales muestran la serie de tiempo del movimiento de balance, las estimaciones de frecuencia natural de balance, las salidas del detector y la salida del indicador consciencia de alarma del estado del mar.

10.1 ENSAYO 1 ($H_w = 3m$, $w_e = 0.956 \text{ rad/s}$)

Ilustración 28: Análisis Ensayo 1. ($H_w=3m$, $w_e = 0.956 \text{ rad/s}$.)



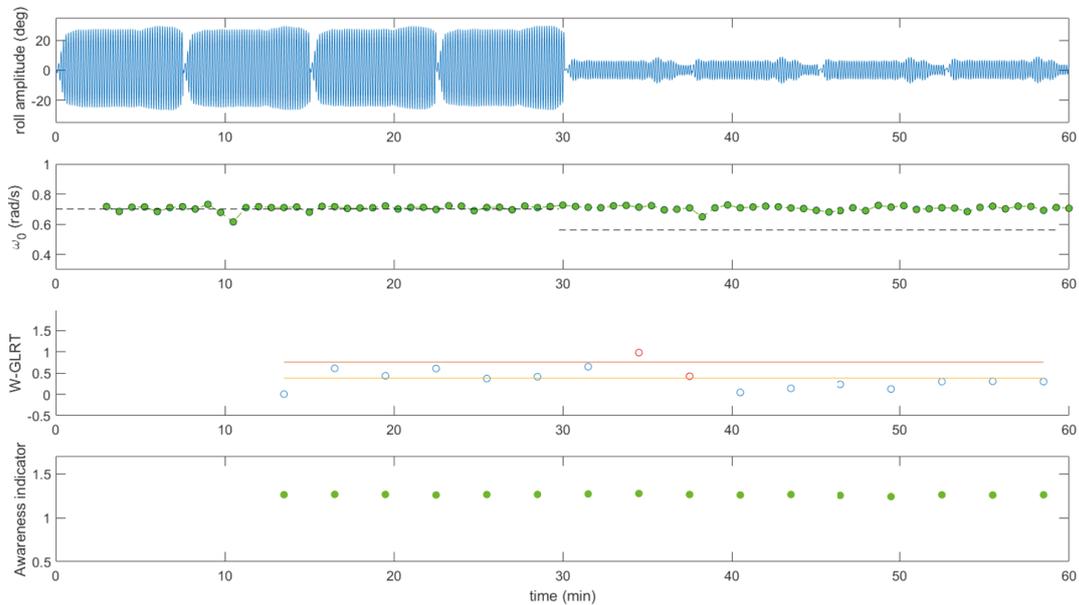
Este primer análisis se corresponde con los ensayos del 17 al 20 de la condición de carga 2 y los ensayos del 1 al 4 de la condición de carga 1, respectivamente de izquierda a derecha en la gráfica anterior. En primer lugar, el estimador de frecuencia EMD-HHT (el segundo desde arriba) desempeña su función correctamente en la segunda situación de carga (LC2), condición segura de estudio, aunque con cierta dispersión, pero la frecuencia natural de balance no está muy distante de la frecuencia objetivo de LC2, en este caso la diferencia entre la mediana de las estimaciones de w_0 y el valor objetivo es de un 3%. En cambio, en lo referente a la situación de carga 1 (LC1), que se corresponde a la condición insegura del estudio, se puede ver cierta dispersión también, pero una distancia mayor entre la mediana de las estimaciones de w_0 sobre la frecuencia objetivo, resultando un 10,2%, esto se debe a un bajo rendimiento del filtro que se aplica en este ensayo por ser $w_e = 0.956 \text{ (rad/s)} > 0.829 \text{ (rad/s)} = w_c$. No obstante, se puede decir que los resultados son buenos.

A continuación, en cuando al desempeño del detector es capaz de identificar correctamente LC2, pero no es sensible al cambio de condición de carga, como se puede observar a LC1 la detecta como una situación segura y no salta ninguna alarma, cuando deberían figurar varias situaciones de peligro porque se trata de una condición insegura.

Por último, el indicador de consciencia se mantiene constantemente en verde durante todo el ensayo indicando que todo figura correctamente cuando no debería ser así. Pero es normal que en este figuren estas indicaciones porque el indicador de consciencia es muy dependiente del estimador de frecuencia. Por tanto, al obtener unos resultados en LC1 tan distantes al objetivo el indicador no es capaz de diferenciar correctamente las situaciones de riesgo y reflejarlas como tal, y no es lo suficientemente sensible al cambio de condición de carga.

10.2 ENSAYO 2 ($H_w = 3m$, $w_e = 0.717 \text{ rad/s}$)

Ilustración 29: Análisis Ensayo 2. ($H_w=3m$, $w_e=0.717 \text{ rad/s}$)



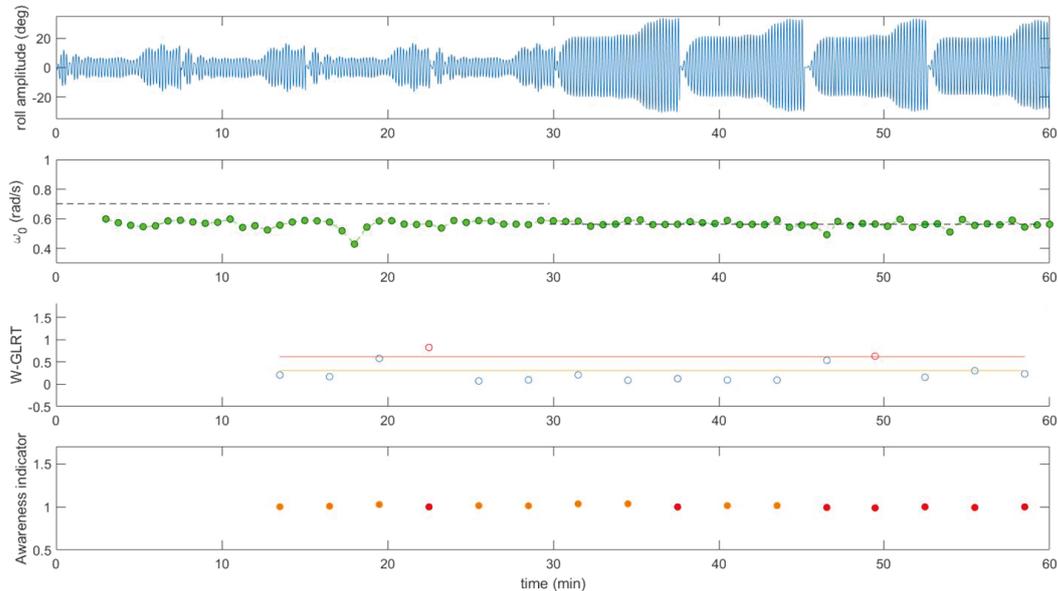
Este segundo caso, se corresponde con los ensayos del 21 al 23 de LC2 y los ensayos del 5 al 8 de LC1, respectivamente de izquierda a derecha en la gráfica. Para empezar, la frecuencia de encuentro de la ola ($w_e = 0.717 \text{ rad/s}$) es menor que $w_c = 0.829$ por este motivo no se aplicará el filtro de paso de banda. Además, se encuentra muy cercana a la frecuencia objetivo de LC2 que es de 0.701 rad/s , provocando resonancia en esta situación de carga. Esta particularidad hace que el estimador de frecuencias muestre muy buenos resultados en cuando a LC2 se refiere, donde prácticamente no existe distancia entre la mediana de las estimaciones de w_0 y la frecuencia objetivo, con un valor del 1%. En cambio, en el caso de LC1, aunque en este caso el estimador ha reflejado unos valores más correctos que en el primer ensayo, sobre todo porque prácticamente no tienen dispersión, pero aun así están muy alejados de la frecuencia objetivo, con un valor del 14%, es decir, que el estimador de frecuencias vuelve a ser poco sensible con respecto al cambio de la situación de carga.

En cuanto al rendimiento del detector en este análisis vuelve a darse la misma situación que en el ensayo explicado anteriormente, refleja una buena detección de la condición segura LC2, pero no un correcto rendimiento al cambiar de condición de carga a LC1, aunque a diferencia del ensayo 1 en este caso el detector consigue identificar alguna de las situaciones de riesgo dando alarma de estas.

Por último, el indicador de consciencia se mantiene constantemente en verde, como en el primer ensayo, durante todo el análisis indicando que todo figura correctamente cuando no debería ser así. Siendo incapaz de responder adecuadamente por el mismo motivo expuesto en el caso anterior.

10.3 ENSAYO 3 ($H_w = 3m$, $w_e = 0.574 \text{ rad/s}$)

Ilustración 30: Análisis Ensayo 3. ($H_w=3m$, $w_e=0.574 \text{ rad/s}$)



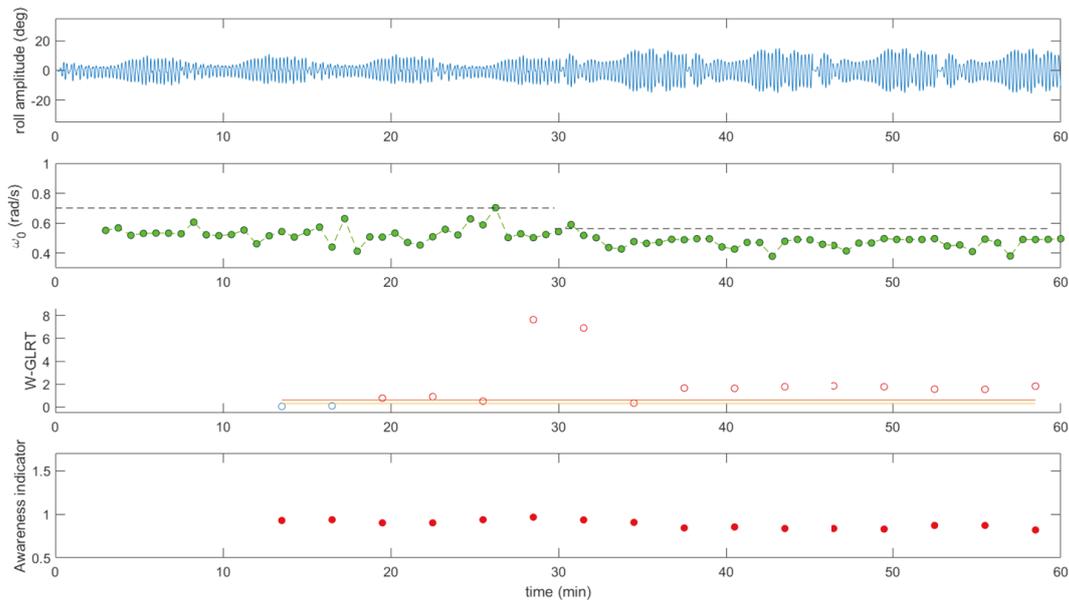
El tercer análisis se corresponde con los ensayos del 25 al 28 de LC2 y del 9 al 12 de LC1, respectivamente de izquierda a derecha en la gráfica. Se vuelve dar la situación donde $w_e = 0.574 < w_c$ lo que implica que no se aplicará el filtro de paso de banda. En este caso, en el estimador de frecuencias EMD-HHT se produce el caso opuesto a los ensayos anteriores, es decir, no es capaz de obtener buenos resultados en LC2 encontrándose la mediana de frecuencias w_0 ciertamente distante de la frecuencia objetivo, con valor del 12%. Por otro lado, estima bastante bien la condición insegura (LC1) pero esto se debe al efecto de resonancia producido por lo cercana que se encuentra la frecuencia de encuentro con respecto a la frecuencia objetivo, facilitando el trabajo del estimador, y dando en este caso una diferencia entre la mediana del estimador de frecuencia natural de balance y la frecuencia objetivo de un 0.07%.

En lo que al detector se refiere, refleja un análisis correcto de la condición segura (LC2) pero no es sensible al cambio de situación de carga, lo mismo que se produce en los casos anteriores. Donde nuevamente en LC1 no genera alarmas de peligro cuando debería suceder, además de que se trata del ensayo donde se produce resonancia en la condición de carga insegura y en los ensayos prácticos se pudo ver como en LC1 embarcaba agua en cubierta.

Por último, el indicador de consciencia al ser tan dependiente del estimador de frecuencia indica en este caso de forma correcta las alarmas de la condición insegura (LC1) pero no se desenvuelve adecuadamente en cuanto a la condición segura se refiere (LC2). Esto sucede porque en este ensayo la situación de carga 2 figura muy distante de la frecuencia objetivo, esto dificulta la labor del indicador para reflejar correctamente que el buque se encuentra en condiciones seguras de operación.

10.4 ENSAYO 4 ($H_w = 3m, w_e = 0.478 \text{ rad/s}$)

Ilustración 31: Análisis Ensayo 4. ($H_w=3m, w_e=0.478 \text{ rad/s}$)



Este último análisis, se corresponde con los ensayos del 29 al 32 de LC2 y del 12 al 16 de LC1, respectivamente de izquierda a derecha en la gráfica. Otro caso donde no se aplicará el filtro de paso de banda porque no se cumple la condición al ser $w_e < w_c$. El estimador de frecuencias vuelve a mostrar mejores resultados en LC1 que en LC2 como en el ensayo 3 pero no tan preciso en la condición insegura como en el estudio mencionado. Aquí se puede ver una mayor distancia en LC2 respecto a la frecuencia objetivo y cierta dispersión, dando un valor del 17%. Y en el caso de LC1, aunque se estima mejor, sigue resultando una diferencia entre la mediana de las estimaciones y el valor objetivo de la condición de carga 1 del 8,6%.

En segundo lugar, el rendimiento del detector es bueno con respecto a los resultados que obtiene en la situación de carga 1, identificándola como insegura e indicando sus correspondientes alarmas, pero sucede todo lo contrario en la situación segura, donde comienza detectando como segura dos puntualidades, pero luego no es capaz de analizar LC2 completamente de forma correcta.

Finalmente, el indicador de consciencia figura constantemente en rojo, es decir, en alarma constante, esto muestra un mal funcionamiento en esta parte dado que no es sensible al cambio de condición de carga porque LC2 no deberían figurar alarmas de peligro, pero como se comentó en casos anteriores, al tener dependencia de los resultados que obtiene el estimador de frecuencias es normal en este caso que no se indique correctamente el estado de LC2. En cambio, la situación de riesgo la detecta como tal.

10.5 RESUMEN DE FRECUENCIA NATURAL DE BALANCE PARA LAS DIFERENTES CONDICIONES DE CARGA Y ESTADO DE MAR

En la siguiente tabla se podrán ver los resultados referentes a las respectivas medianas, desviaciones y percentiles que se han obtenido de las estimaciones de frecuencia natural.

Tabla 11: Frecuencia natural de balance objetivo

Frecuencia natural objetivo (rad/s)	
LC1	0.563
LC2	0.701

Tabla 12: Resumen de frecuencia natural de balance

	Mediana (rad/s)		Desviación típica (rad/s)		Percentil 05 (rad/s)		Percentil 95 (rad/s)	
	LC1	LC2	LC1	LC2	LC1	LC2	LC1	LC2
Condición de mar 1	0.6651	0.6707	0.0525	0.0866	0.6103	0.4645	0.7542	0.7693
Condición de mar 2	0.7095	0.7114	0.0151	0.0197	0.6826	0.6794	0.7252	0.7252
Condición de mar 3	0.5623	0.5741	0.0210	0.0301	0.5250	0.5213	0.5940	0.5949
Condición de mar 4	0.4766	0.5289	0.0331	0.0541	0.3937	0.4453	0.4998	0.6296

10.6 RESUMEN DE RESULTADOS DEL DETECTOR Y MATRIZ DE CONFUSIÓN DEL DETECTOR

Tabla 13: Resumen resultados detector

Condición de mar	Condiciones de carga			
	LC1		LC2	
	TD	FD	TD	FD
1	0	10	6	0
2	2	8	6	0
3	1	9	5	1
4	10	0	2	4
	10		6	
	Total		Total	

Tabla 14: Matriz de confusión del detector

		Condición verdadera	
		Condición positiva	Condición negativa
Condición prevista	Condición positiva	19	27
	Condición negativa	5	13
		Sensibilidad	Especificidad
		79.17%	32,50%

Como se puede ver en las tablas expuestas a modo de resumen sobre el rendimiento del detector, se puede observar la tendencia clara de que se han obtenido mejores detecciones de la condición segura que de la condición insegura, en todos los ensayos a excepción del último, donde el detector ha identificado de forma correcta la situación de carga 2, y se ha obtenido peores resultados en la situación de carga 1.

Esto lo respalda la matriz de confusión, la cual representa la sensibilidad, que es la tasa verdadera positiva, con un buen porcentaje. En cambio, la especificidad, que indica la tasa verdadera negativa, indica un valor bastante bajo e inferior al 50% que se podría llegar a considerar positivo.

11 DISCUSIÓN

Conforme con los resultados que se han presentado, se puede decir que el sistema de control de la estabilidad del buque que se ha estudiado y probado muestra un rendimiento bajo. Se ha podido ver que no es capaz de detectar situaciones de riesgo correctamente y no informa bien sobre la gravedad en la que se encuentra el buque según la condición de carga que posea en ese momento, porque no es lo suficientemente sensible cuando el buque cambia de condición de carga.

El sistema EMD-HHT es capaz de realizar una estimación de la frecuencia natural de balance del navío con un cierto grado de dispersión y distancia entre los resultados y la frecuencia objetivo. En ningún caso ha tenido una desviación superior al 20%. Aunque, como se ha podido ver generalmente solo es capaz de estimar una situación de carga de forma adecuada. Esto se debe a la influencia de la frecuencia de ola en la metodología, ya que como se puede observar para el estado de mar 2 y 3 lo que se obtiene de resultado del EMD+HHT es un valor muy próximo a la frecuencia de ola. Al obtenerse unas frecuencias estimadas alejadas de la frecuencia objetivo el rendimiento del sistema de estimación disminuye, comparado con los casos en los que se producen resonancia donde el estimador obtiene mejores resultados porque se llega a solapar la frecuencia objetivo con la frecuencia de encuentro de la ola. Cuando el balance es pequeño, se presentan excitaciones adicionales a la frecuencia natural de balance, o picos localizados que se encuentran alejados, esto produce una modificación en el valor que se espera inicialmente de w_0 .

En cuanto al trabajo del detector se refiere, su rendimiento en estos casos es bastante bajo, esto se debe al porcentaje tan bajo de especificidad que aporta al sistema y

generalmente no es capaz de detectar correctamente las situaciones inseguras y alertar adecuadamente el riesgo como corresponde y se producen un gran número de falsas alarmas. Esto es debido a que los valores de frecuencia obtenidos del EMD+HHT para las dos condiciones de carga son muy parecidos, por lo que tiene un cierto grado de dependencia. Mirando el lado positivo, la situación segura la suele identificar de forma adecuada en casi todos los ensayos, esto se puede ver reflejado en el buen porcentaje de sensibilidad obtenido y se producen pocas pérdidas de detecciones en estos casos.

Finalmente, en cuanto al sistema indicador de consciencia, su función se basa en lo precisa que sean las estimaciones del estimador de frecuencia EMD-HHT. Por tanto, si se producen grandes dispersiones o se tienen elevados porcentajes de distancia entre las frecuencias obtenidas por el estimador y la frecuencia objetivo no será capaz de identificar correctamente la alarma visual que debe indicar. Generalmente en los ensayos estudiados, cuando el estimador obtenía buenos resultados, el indicador actuaba correctamente, el problema es que esto solo se producía en una condición de carga, la otra situación de carga no era capaz de indicarla como debería de ser, esto refleja que el indicador de consciencia es poco sensible a las variaciones de carga.

12 CONCLUSIONES

Los sistemas de control en tiempo real de las variaciones transversales de estabilidad en buques de pesca podrían llegar a solucionar el problema principal que en este sector se produce, que es el número de accidentes mortales que se tienen durante las diferentes etapas del trabajo en el sector pesquero.

La validación experimental que se ha realizado mediante los diferentes escenarios, condiciones de carga seguras e inseguras, ayudó a identificar la capacidad del sistema para analizar las diferentes variaciones que se puedan producir en la frecuencia natural de balance, y así proporcionar una alarma al cumplirse las condiciones de riesgo.

El sistema de detección demuestra un rendimiento irregular como para ser capaz de superar las incertidumbres que pueda llegar a presentarse en el estimador de frecuencia natural de balance, generalmente no es capaz de interpretar correctamente las situaciones inseguras. El indicador de consciencia tiene como objetivo facilitar la distinción de los cambios que se puedan producir en la carga, pero es demasiado sensible a las imprecisiones que le envíe el estimador de frecuencias, debido a la dependencia de este sobre el indicador.

Los resultados mostrados proporcionan un desempeño que necesita mejora para el objetivo que se quiere alcanzar, que es determinar las situaciones de riesgo y es precisamente aquí donde el detector suele fallar. Teniendo esto en mente, se puede indicar que el estimador EMD-HHT trabaja correctamente, pero habría que mejorar la capacidad de obtener resultados más cercanos a la frecuencia objetivo y menos dispersos. Porque de este modo consecuentemente mejorará el funcionamiento del indicador de consciencia, y entonces se logre una mejor distinción al producirse variaciones en las condiciones de carga. Para ello se podría trabajar en la mejora del filtro de paso de banda para intentar eliminar la frecuencia de ola de la señal de balance del buque.

En cuanto al detector, para incrementar su desempeño se podría revisar el límite por el cual se activa la alarma, pudiéndolo hacer más sensible a los pequeños cambios.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL BUQUE.

DAVID CASTELLANO ACOSTA.

El siguiente paso, después de mejorar esta herramienta, sería verificar la capacidad de trabajo del sistema en condiciones de mar diferentes e impactos que no sean desde el costado, con el buque en avance a velocidades que no sean cero, olas irregulares y considerando los efectos dinámicos de las maniobras en los trabajos de pesca.

13 BIBLIOGRAFÍA

- Bhattacharyya, R. (1978). Dynamics of Marine Vehicles.
- Bulian, G., & Francescutto, A. (2004). A simplified modular approach for the prediction of the roll motion due to the combined action of wind and waves. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 218(3), 189–212. <https://doi.org/10.1243/1475090041737958>
- Comisión Europea. (n.d.). Fleet Register, European Commission. https://webgate.ec.europa.eu/fleet-europa/index_en;jsessionid=bE0_8gggf5vCEvB0YeCzNEKzQbT0uO1cQQZ2ZkjjxKqgfLb1W7FGf!1903504549
- Denis, M. S., & Pierson, W. J. (1953). On the motions of ships in confused seas.
- EMSA. (2019). Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2019.
- EuropaPress. (2019). Sector Pesquero en Galicia. <https://www.europapress.es/galicia/pesca-00247/noticia-xunta-destaca-papel-sector-pieza-indispensable-economia-europa-azul-20190402112819.html>
- FAO Organizational. (2020). EL ESTADO MUNDIAL DE LA PESCA Y LA ACUICULTURA 2020.
- Global Fishing Watch. (2021). Mapa de Calor Pesquero. <https://globalfishingwatch.org/map>
- González, M. M., Sobrino, P. C., Álvarez, R. T., Casás, V. D., López, A. M., & Peña, F. L. (2012). Fishing vessel stability assessment system. Ocean Engineering, 41, 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.12.021>
- Himeno, Y. (1981). Prediction of Ship Roll Damping - A State of the Art.
- International Maritime Organization. (1997). Acta Final de la Conferencia Internacional sobre Seguridad de los Buques Pesqueros, 1993, con sus documentos adjuntos, incluido el Protocolo de Torremolinos de 1993 relativo al Convenio Internacional de Torremolinos para la Seguridad de los Buques Pesquer.
- International Maritime Organization. (2008). MSC.1281 - Notas Explicativas Del Código Internacional De Estabilidad Sin Avería, 2008. 267(85).
- Kay, S. M. (1993). Fundamentals of Statistical Signal Processing.
- Rahola, J. (1939). The judging of the stability of ships and the determination of the minimum amount of stability - especially considering the vessels navigating Finnish waters (p. 121).
- Santiago Caamaño, L. (2019). Study and development of a stability assessment system for shing vessels to prevent capsizing during navigation.
- Santiago Caamaño, L., Galeazzi, R., Míguez González, M., Díaz Casás, V., & Nielsen, U. D. (2019). Experimental Validation of Transverse Stability Monitoring System for Fishing Vessels. IFAC-PapersOnLine. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.283>

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL BUQUE.

DAVID CASTELLANO ACOSTA.

Santiago Caamaño, L., Míguez González, M., Galeazzi, R., Nielsen, U. D., & Díaz Casás, V. (2019). On the application of change detection techniques for the stability monitoring of fishing vessels. Proceedings of the 17th International Ship Stability Workshop, June, 10–12.

SHIPSTAB. (2014). Proceedings of STAB & ISSW.
<http://www.shipstab.org/index.php/conference-workshop-proceedings>

Wolfson Unit. (2004). Research Project 530 Simplified Presentation of FV Stability Information – Phase 1.

Xsens. (2021). Programa MT Manager. <https://www.xsens.com/imu>