



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Máster

CURSO 2020/21

***ESTIMACIÓN DE LA FRECUENCIA DE ENCUENTRO DE OLA
PARA LA MEJORA DE LA EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE
BUQUE EN TIEMPO REAL***

Máster en Ingeniería Naval y Oceánica

ALUMNA/O

José Manuel Ciriano Palacios

TUTORAS/ES

Marcos Míguez González

Lucía Santiago Caamaño

FECHA

SEPTIEMBRE 2021

RESUMEN

La pesca marina es uno de los ámbitos económicos más peligrosos del mundo, y una parte importante de los incidentes del sector está relacionada con fallos en la estabilidad. Una de las principales causas de que esto sea así es la escasa formación en estabilidad de los marineros de este tipo de buques, por lo que en las últimas décadas se han desarrollado distintos sistemas de asistencia para ayudar a la tripulación en este ámbito.

Uno de estos sistemas, desarrollado en los últimos años, busca evaluar la estabilidad del buque en tiempo real a través del análisis del espectro del roll, para así obtener la frecuencia natural de balance y estimar la altura metacéntrica cada poco tiempo. El sistema presenta resultados favorables, aunque en ciertas condiciones se producen interferencias en el espectro, asociadas a las olas incidentes, que empeoran los resultados.

Este proyecto busca mejorar el sistema recién descrito mediante el filtrado de la frecuencia de encuentro de las olas en la señal del roll. Para ello, se realizarán ensayos en el canal de experiencias para evaluar la estimación de la frecuencia de encuentro a través del análisis de la aceleración vertical y el pitch.

RESUMO

A pesca mariña é un dos ámbitos económicos máis perigosos do mundo, e unha parte importante dos incidentes do sector está relacionada con fallos na estabilidade. Unha das principais causas de que isto sexa así é a escasa formación en estabilidade dos mariñeiros deste tipo de buques, polo que nas últimas décadas desenvóléronse distintos sistemas de asistencia para axudar á tripulación neste ámbito.

Un destes sistemas, desenvolvido nos últimos anos, busca avaliar a estabilidade do buque en tempo real a través da análise do espectro do roll, para así obter a frecuencia natural de balance e estimar a altura metacéntrica cada pouco tempo. O sistema presenta resultados favorables, aínda que en certas condicións prodúcense interferencias no espectro, asociadas ás ondas incidentes, que empeoran os resultados.

Este proxecto busca mellorar o sistema recentemente descrito mediante o filtrado da frecuencia de encontro das ondas na sinal do roll. Para iso, realizaranse ensaios na canle de experiencias para avaliar a estimación da frecuencia de encontro a través da análise da aceleración vertical e o pitch.

ABSTRACT

Marine fishery is one of the most dangerous economical fields worldwide, and an important part of this sector incidents is related to stability failures. One of the main causes of this situation is seamen's lack of training concerning the stability in this kind of vessels, so different guidance systems for helping the crew on this subject had been developed in last decades.

One of these systems, developed in recent years, looks for a real time stability assessment by roll spectrum analysis, so the roll natural frequency is obtained and the metacentric height is estimated every short period of time. The system offers positive results, but in some conditions interferences in the spectrum appear – related to incident waves – that worsen the results.

This project tries to improve the system just described by filtering the wave encounter frequency on the roll signal. In this line, towing tank trials are carried out to assess the wave encounter frequency estimation through vertical acceleration and pitch analysis.

ÍNDICE

1	Introducción.....	1
2	Objetivo.....	4
3	Antecedentes.....	5
3.1	Evolución de los sistemas guía de la estabilidad a bordo.....	5
3.2	Sistema de estimación de GM a través de la FFT.....	7
3.3	La frecuencia de encuentro buque-olas.....	10
4	Metodología.....	12
5	Ensayos.....	13
5.1	Descripción del modelo.....	13
5.2	Análisis de las condiciones de ola.....	16
5.3	Planteamiento y realización de los ensayos.....	17
5.4	Procesado de datos.....	19
6	Resultados.....	22
6.1	Resultados de la estimación de la frecuencia de encuentro.....	22
6.2	Resultados de la estimación de la frecuencia natural de roll.....	27
7	Discusión.....	36
7.1	Discusión de los resultados de la estimación de ω_e	36
7.2	Discusión de los resultados de la estimación de ω_0	36
8	Conclusiones.....	38
9	Bibliografía.....	39
ANEXO 1.	Ensayos y estimaciones de ω_e	40
ANEXO 2.	Resultados de estimaciones de ω_0	72

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Porcentajes acumulativos de muertes en accidentes de buques pesqueros canadienses entre 1999 y 2010, agrupados por tipo de accidente (Santiago Caamaño, 2019).....	2
Ilustración 2 Ejemplo de matriz de estabilidad de Womack (Marcos Míguez González et al., 2012).....	6
Ilustración 3 Pantalla principal del sistema SKIPPER (Marcos Míguez González et al., 2012).....	6
Ilustración 4 Representación esquemática de la estabilidad transversal del buque (Wikipedia, 2019).....	7
Ilustración 5 Esquema de la aplicación recursiva de la FFT (M. Míguez González et al., 2017).....	9
Ilustración 6 Definición de los ángulos de incidencia de las olas (Lloyd, 1998).....	11
Ilustración 7 Modelo del buque. Arriba: caja de cuadernas y modelo matemático (Allegue García, 2020). Abajo: modelo empleado en los ensayos de canal (Santiago Caamaño, 2019).....	14
Ilustración 8 Ejemplo de señal del roll en un ensayo de extinción (Santiago Caamaño et al., 2019).....	15
Ilustración 9 Vista del canal de experiencias (Santiago Caamaño, 2019).....	18
Ilustración 10 Posicionamiento del modelo durante los ensayos con olas de costado (arriba) y con olas de proa (abajo).....	18
Ilustración 11 Ejemplo de procesado de señales.....	20
Ilustración 12 Ejemplo de los resultados obtenidos en la estimación de ωe en uno de los ensayos.....	23
Ilustración 13 Resultados de las estimaciones de ωe agrupados por tipos de ensayos.....	26
Ilustración 14 Error cometido en las estimaciones de ωe , agrupados por método de estimación (entre -5 y 5%).....	27
Ilustración 15 Ejemplo de filtrado del roll mediante ωe *.....	28
Ilustración 16 Filtros aplicados para la estimación de $\omega 0$	30
Ilustración 17 Evolución de $\omega 0$ * con el tiempo.....	34
Ilustración 18 Evolución del error en la estimación de $\omega 0$ con el tiempo (entre -10 y 10%).....	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Distribución de la flota pesquera española (Secretaría General de Pesca, 2021)	1
Tabla 2 Parámetros del buque	13
Tabla 3 Condición de carga empleada en el estudio	16
Tabla 4 Matriz de ensayos (escala real y escala modelo).....	17
Tabla 5 Ensayos válidos y ajuste temporal (escala real)	21
Tabla 6 Resultados de la estimación de ωe : ensayo 1-8	24
Tabla 7 Resultados de la estimación de ωe : ensayos 9-16	24
Tabla 8 Resultados de la estimación de ωe : ensayo 17-24	25
Tabla 9 Resultados de la estimación de ωe : ensayo 25-32	25
Tabla 10 Resultados de la estimación de $\omega 0$: olas de costado (ensayos 1-16)	32
Tabla 11 Resultados de la estimación de $\omega 0$: olas de proa (ensayos 17-32)	33

1 INTRODUCCIÓN

La estabilidad es uno de los aspectos más importantes y cruciales a tener en cuenta en el sector marítimo. Este término hace referencia tanto al comportamiento hidrostático e hidrodinámico del buque (esto es, su capacidad de mantenerse erguido y estable frente a las condiciones ambientales y meteorológicas) como a la seguridad (entendida como la capacidad de asegurar la integridad del buque, de las personas a bordo y de la carga transportada). Es por este motivo, así como por lo catastrófico que puede llegar a ser un accidente marítimo en lo referente a pérdidas personales, económicas y medioambientales, que la estabilidad es un tema que atañe a armadores, constructores y administraciones por igual (Santiago Caamaño, 2019).

Dentro de este sector, es destacable el caso de la pesca marina (sobre todo en un país como España, que cuenta con una considerable flota pesquera y en el que es uno de los sectores económicos más importantes) (Allegue García, 2020). A finales de 2020, la flota española contaba con 8839 buques pesqueros vigentes, de los cuales casi 6500 eran buques por debajo de los 12 m de eslora y más de 1500 se encontraban entre los 12 y los 24 m (Secretaría General de Pesca, 2021).

Tabla 1 Distribución de la flota pesquera española (Secretaría General de Pesca, 2021)

Distribución de la flota por tramos de eslora población vigente a 31.12.2020:

Eslora Total	<12 m	≥12 y <15 m	≥ 15 y <24 m	≥ 24 m
<i>Nº Buques:</i>	6.482	674	997	686
<i>Arqueo medio (Gt):</i>	2,28	13,28	49,87	373,30
<i>Potencia media (Kw):</i>	23,55	72,32	161,11	598,38
<i>Edad media (años):</i>	38	25	22	20

Distribución de la flota por tramos de arqueo (población vigente a 31.12.2020):

Arqueo	< 10 Gt	≥ 10 y < 100 Gt	≥ 100 y < 600 Gt	≥ 600 Gt
<i>Nº Buques:</i>	6.616	1.611	529	83
<i>Arqueo medio (Gt):</i>	2,38	38,50	224,84	1.600,63
<i>Potencia media (Kw):</i>	24,37	140,31	405,48	2.057,26
<i>Edad media (años):</i>	37	23	20	22

La pesca marina es una de las actividades económicas más peligrosas que existen hoy en día. En 2013, el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo realizó un estudio en el cual se analizaron 100 accidentes marítimos pesqueros muy graves ocurridos en España entre 2008 y 2013. Afirmaba que en esa fecha el índice de incidencia de accidentes laborales mortales fue de 31.2, cuando la media del total de actividades económicas estaba en un 3.33 y el índice de la construcción era de 8.89 (Moreno Reyes & Gómez-Cano Alfaro, 2014).

Tras analizar los casos estudiados, dicho estudio concluyó que algunas de las principales causas de siniestralidad en la pesca marina están relacionadas con factores individuales/personales, entre los que se destaca el incumplimiento de las normas de seguridad establecidas (tales como el Reglamento de Abordajes, las inspecciones reglamentarias del buque o los criterios de estabilidad del buque). Este

tipo de causas están presentes en más de la mitad de los accidentes investigados, y sólo se ven superados por causas relacionadas con deficiencias en la organización del trabajo (entre las que se destaca la formación como aspecto importante a mejorar) (Moreno Reyes & Gómez-Cano Alfaro, 2014).

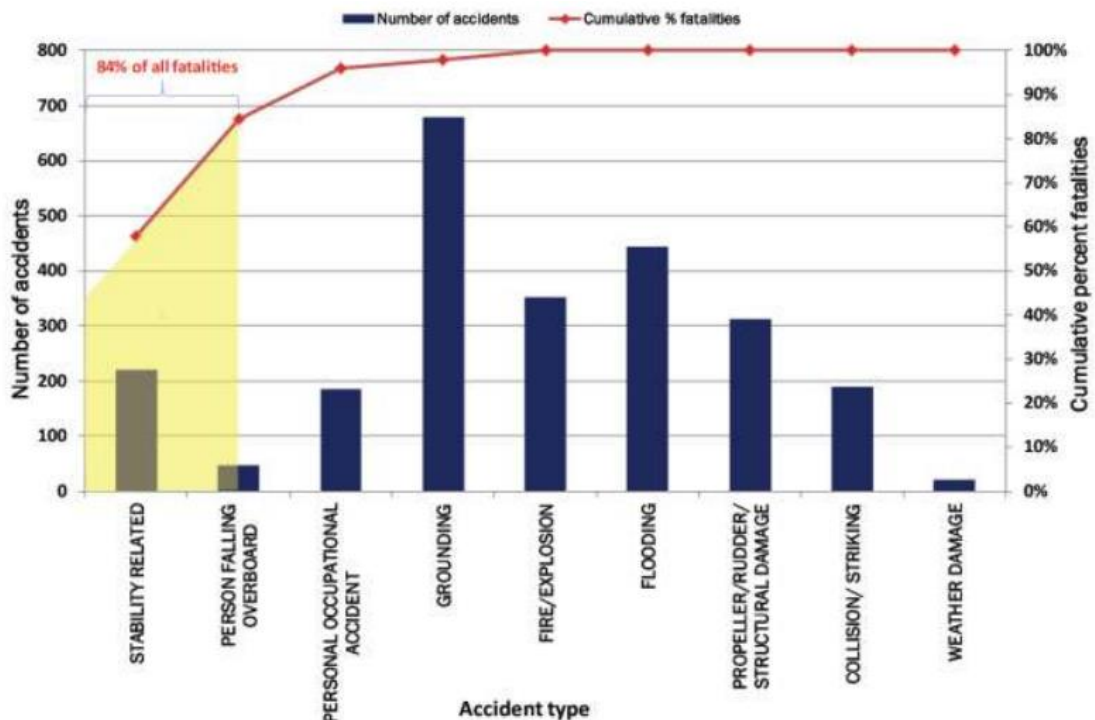


Ilustración 1 Porcentajes acumulativos de muertes en accidentes de buques pesqueros canadienses entre 1999 y 2010, agrupados por tipo de accidente (Santiago Caamaño, 2019)

Esto no es un problema aislado de la flota pesquera española. La pesca también se considera una de los trabajos más peligrosos en todo el mundo, incluyendo países como EEUU, Corea y otros países costeros de la Unión Europea (Santiago Caamaño et al., 2019). Y en lo que se refiere a la estabilidad, la Ilustración 1 muestra unos resultados parecidos a los descritos en el párrafo anterior en un estudio canadiense. Como puede verse, aunque el número de accidentes relacionados con la estabilidad es más bajo que otro tipo de causas, por sí solo supone más de la mitad de las muertes producidas en los incidentes estudiados (Santiago Caamaño, 2019). Por tanto, no es descabellado aventurar que los problemas de estabilidad afectan a las flotas pesqueras por todo el mundo y que son de los más peligrosos que pueden tener lugar.

Hay varias posibles causas por las que los problemas de estabilidad sean tan frecuentes para buques pesqueros:

- Para empezar, son buques con poco francobordo para poder faenar. Esto no deja de facilitar la inundación de la cubierta principal y, en caso que las puertas y escotillas se encuentren abiertas, la entrada de agua en otros espacios (Santiago Caamaño, 2019).
- Otro aspecto que considerar es que los armadores intentan hacer que sus barcos sean capaces de operar en distintos caladeros, para así hacer frente a la estacionalidad de ciertas especies y poder trabajar la mayor parte del año que sea posible. Por tanto, los buques se modifican, lo que muchas veces resulta en una reducción del margen de estabilidad (Santiago Caamaño, 2019).

- Siguiendo con el tema de la productividad, es importante hacer hincapié en la enorme presión económica a la que están sometidos los pescadores. Si se toma en cuenta que su salario y sus beneficios dependen directamente de la cantidad de pescado que logran atrapar, es comprensible que acepten los riesgos de su trabajo y lo tomen como algo inherente a su oficio. Esta mentalidad supone que no prioricen su seguridad a bordo por centrarse en pescar lo máximo posible antes de volver a puerto (Santiago Caamaño, 2019).
- Para terminar con los pescadores, estos presentan en líneas generales una destacable carencia en su formación en lo referente a la estabilidad. La normativa internacional obliga a los buques pesqueros de más de 12 m de eslora a llevar a bordo el libro de estabilidad, que incluye cuatro condiciones de carga significativas. Eso obliga a realizar los cálculos manualmente para condiciones de carga intermedias. No obstante, gran parte de los pescadores no son capaces de entender este documento. Si a eso se le suma el tiempo que lleva hacer los cálculos para condiciones intermedias, se observa que es muy común que los capitanes estimen el margen de seguridad en base a su experiencia previa, la cual no suele considerar incidentes (Santiago Caamaño, 2019).
- Aprovechando que en el apartado anterior se ha mencionado la normativa internacional, hay que considerar la falta de regulación en ciertos aspectos. Mientras que para la marina mercante existen códigos, reglamentos y protocolos a nivel internacional, esa normativa no aplica a buques pesqueros. Como mucho, hay acuerdos y códigos (de la Organización Marítima Internacional, de la Organización Internacional del Trabajo o de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) dirigidos a pesqueros de más de 24 m de eslora, pero para buques más pequeños algunas de las normativas aplicables son de ámbito nacional y no de aplicación internacional (Santiago Caamaño, 2019).
- A esto hay que sumarle que los barcos pequeños son los que más problemas pueden experimentar, debido a que son más sensibles a vientos fuertes y oleaje agitado (Santiago Caamaño, 2019). En el estudio español mencionado anteriormente se observó que los buques de menor tamaño sufrieron más accidentes (por ejemplo, el 74% de los buques estudiados que se hundieron tenían menos de 15 m de eslora) (Moreno Reyes & Gómez-Cano Alfaro, 2014). Y no hay que olvidar que, por ejemplo, en España los buques por debajo de los 24 m representan la amplia mayoría de la flota (ver Tabla 1).

A raíz de todo esto, desde hace dos décadas han surgido varios intentos de desarrollar sistemas que asistan a los pescadores y que sirvan como guía, aportando información básica de la estabilidad de forma simple e intuitiva (Marcos Míguez González et al., 2012). Con el paso de los años estos sistemas han evolucionado hasta la tendencia actual de desarrollar sistemas que permitan evaluar la estabilidad del barco en tiempo real con la mínima interacción posible por parte de la tripulación. En este ámbito, el presente proyecto se centra en estudiar el sistema de evaluación de la estabilidad en tiempo real propuesto por (M. Míguez González et al., 2017).

2 OBJETIVO

La finalidad de este proyecto es estudiar la posibilidad de mejorar el método propuesto por (M. Míguez González et al., 2017) para la estimación en tiempo real de la estabilidad transversal de un buque pesquero a partir del movimiento de balance. Para ello, se calcularán los espectros del cabeceo (pitch) y de la aceleración vertical, y se evaluará su validez a la hora de usarlos para estimar la frecuencia de encuentro de las olas con el buque. Posteriormente se tratará de filtrar esa frecuencia de encuentro estimada en la señal del balance (roll) y se comprobará si los resultados obtenidos son más exactos.

Con este objetivo, se trabajará usando como base el programa desarrollado anteriormente para la estimación de la frecuencia natural del roll, ω_0 . Dicho programa se basa en el empleo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para obtener el espectro de potencia del roll, de modo que se considera como ω_0 el valor de la frecuencia para la cual se alcanza el valor máximo del espectro. La aplicación recursiva de este cálculo a lo largo del tiempo, además de su promediado y suavizado sucesivo, permiten hablar de una estimación en tiempo real de ω_0 . Este resultado se emplea para realizar una estimación en tiempo real de la altura metacéntrica del buque, GM , de modo que así se consigue evaluar la estabilidad transversal de este.

El presente proyecto se enmarca en la observación de que la fiabilidad del programa recién descrito presenta errores en distintas situaciones, siendo la más destacable cuando el buque se encuentra en presencia de olas más pequeñas (Santiago Caamaño et al., 2019). En esta situación se observó que, ya que el buque no experimenta grandes oscilaciones, el pico del espectro del roll correspondiente a ω_0 es más pequeño de lo habitual, de modo que el máximo de la curva suele alcanzarse para la frecuencia de encuentro de las olas, ω_e . Es por ello por lo que se plantea la necesidad de ampliar el algoritmo para intentar filtrar esta frecuencia, de modo que el máximo del espectro corresponda a la frecuencia natural del roll.

Para ello, se propone aplicar la FFT a las señales del pitch y de la aceleración vertical, a_z , ya que es plausible que sus respectivos espectros presenten su máximo para ω_e . En este proyecto se procederá a comprobar, mediante ensayos en el canal de experiencias, si esta hipótesis es correcta para, posteriormente, comparar los resultados obtenidos por cada vía. Finalmente, si se observa que la suposición era correcta, se comprobará la efectividad de aplicar el filtro antes mencionado en la estimación de ω_0 .

3 ANTECEDENTES

3.1 Evolución de los sistemas guía de la estabilidad a bordo

Estos sistemas empezaron a aparecer hace unos 20 años para intentar hacer frente a los problemas de estabilidad que se originaban en buques pesqueros. Su objetivo es presentar, de forma clara, visual y simple, la información imprescindible concerniente a la estabilidad del buque, para servir a la tripulación como guía (Marcos Míguez González et al., 2012).

Las características ideales que debe tener un sistema de asistencia a la estabilidad son las siguientes (Santiago Caamaño, 2019):

- Debe ser fácil de usar, y la información que aporte debe ser clara y concisa para que los trabajadores la interpreten fácil y rápidamente.
- Debe ser fácil de actualizar, en caso de que se realicen modificaciones en el buque.
- Debe suponer un bajo coste de adquisición, instalación y mantenimiento. Además, debe interferir lo mínimo posible en la operación del buque y en el trabajo de los tripulantes.
- Debe requerir la mínima interacción posible por parte de los trabajadores, de forma que cuanto más automático sea para aportar la información, mejor.
- Debe ser capaz de considerar el mayor número posible de condiciones de carga de forma precisa, cubriendo por completo el rango de operación del buque.
- Debe ser capaz de alertar en caso de que se detecte una inestabilidad o que el buque esté próximo a entrar en una condición peligrosa.

Como es lógico, con el paso de los años los distintos sistemas han ido evolucionando. A grandes rasgos, pueden distinguirse tres generaciones distintas (M. Míguez González et al., 2017):

1. La primera generación se basaba en el empleo de posters, en los cuales se recogían distintas condiciones de carga posibles y se señalaba el grado de peligrosidad de cada una de ellas de forma visual, mediante colores. Un ejemplo de este tipo de sistemas fue propuesto por Womack en torno al año 2000, que empleaba una serie de matrices de colores para representar la información (ver Ilustración 2).
Este sistema resultó fácilmente aplicable en barcos pequeños, pero su aplicación a barcos mayores se vio limitada por la complejidad que adquirirían las matrices al aumentar el número de tanques, salas y bodegas. Además, el dejar en manos de los trabajadores la selección de la condición de carga que se ajuste mejor a la actual introduce en el sistema cierto grado de subjetividad e incertidumbre (Santiago Caamaño, 2019).

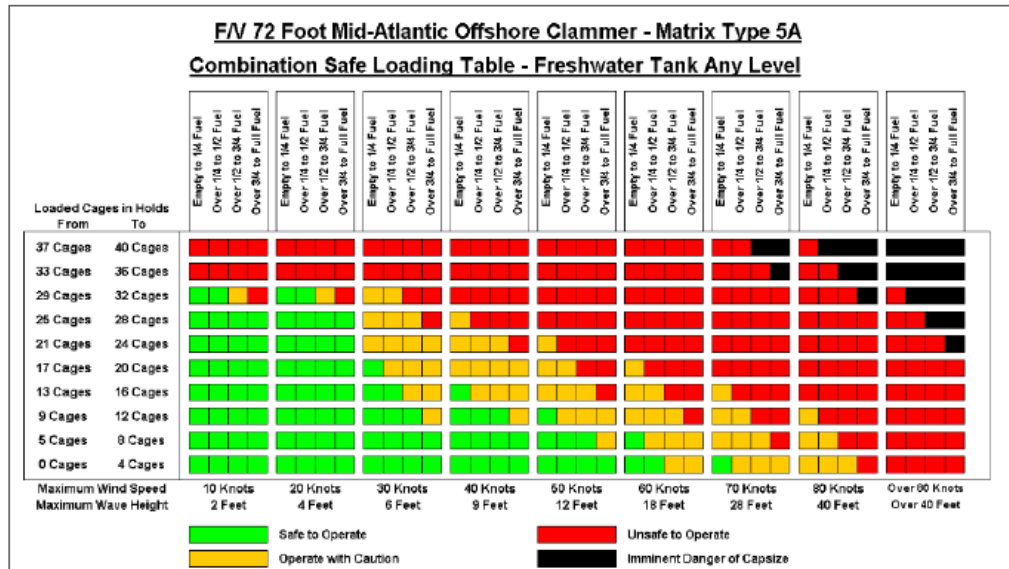


Ilustración 2 Ejemplo de matriz de estabilidad de Womack (Marcos Míguez González et al., 2012)

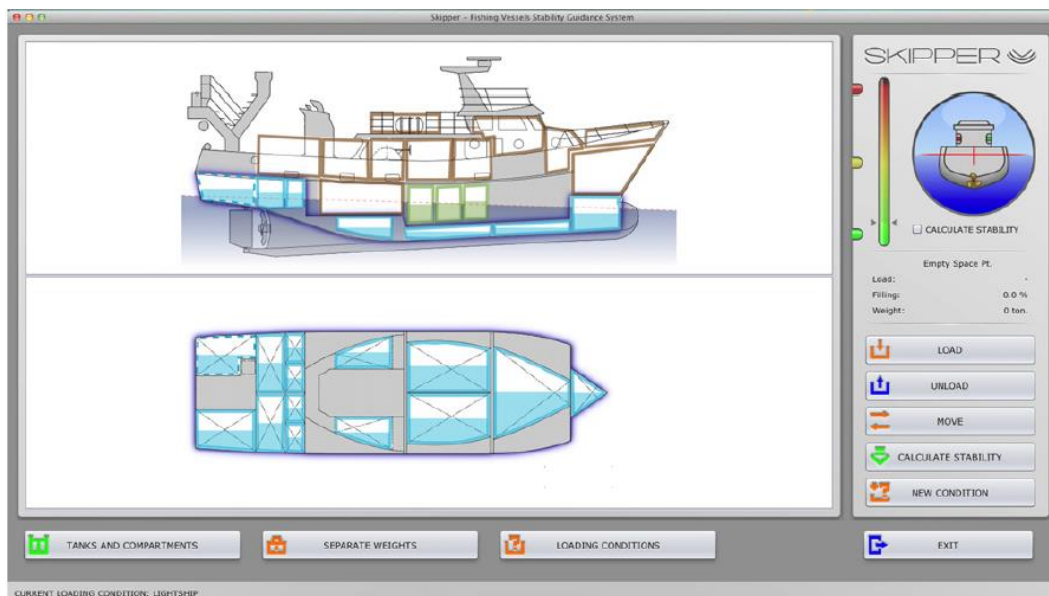


Ilustración 3 Pantalla principal del sistema SKIPPER (Marcos Míguez González et al., 2012)

- El siguiente paso lo supusieron sistemas informáticos simplificados y programas que eran capaces de estimar la estabilidad del buque en función de la información aportada por la tripulación durante su operación. Un ejemplo de este tipo de sistemas es SKIPPER, desarrollado por el Grupo Integrado de Ingeniería o GII, que emplea un software de arquitectura naval con una interfaz sencilla instalado en un ordenador con pantalla táctil. De este modo, el programa realizaba los cálculos de estabilidad en base a la información de la condición de carga introducida por la tripulación, y presenta los resultados mediante un código de colores similar al de los sistemas de la generación anterior (ver Ilustración 3) (Marcos Míguez González et al., 2012). La principal debilidad de este tipo de sistemas es la necesidad de interacción, pues el programa requiere que la tripulación introduzca manualmente la información pertinente de la condición de carga. Esto se traduce en una mayor

o menor incertidumbre en función de la exactitud de los datos introducidos, que dependerán directamente del operario (Santiago Caamaño, 2019).

3. En los últimos años, como respuesta a los intentos de maximizar la facilidad de uso y minimizar la interacción de la tripulación, se ha propuesto un nuevo tipo de sistemas, que abogan por una evaluación automatizada y en tiempo real de la altura metacéntrica del buque, GM , a través de la estimación de la frecuencia natural del balance, ω_0 . Actualmente este tipo de sistemas se encuentran aún en desarrollo, y se necesita más trabajo de validación de resultados.

3.2 Sistema de estimación de GM a través de la FFT

La estabilidad del buque viene dada por una gran cantidad de parámetros: la geometría del barco, la condición de carga, las condiciones ambientales, la respuesta del buque ante estas últimas... Los cálculos básicos de estabilidad se apoyan en dos conceptos fundamentales e interrelacionados entre sí: la altura metacéntrica, GM , y el brazo adrizante, GZ . El GM está relacionado con la estabilidad inicial del buque (sin estar sometido a momentos escorantes), mientras que el GZ refleja la capacidad de este para recuperar su posición de equilibrio cuando experimenta una escora. La relación entre estos dos parámetros viene dada por la siguiente expresión (Santiago Caamaño, 2019):

$$GZ = \begin{cases} GM \times \sin \varphi, \forall \varphi < 10^\circ \\ KN - KG \times \sin \varphi = KN - (KM - KG) \times \sin \varphi, \forall \varphi > 10^\circ \end{cases} \quad (3.1)$$

donde φ representa la escora, KG es la altura del centro de gravedad desde la quilla (K) y KN son curvas empleadas para calcular la estabilidad del buque (ver Ilustración 4).

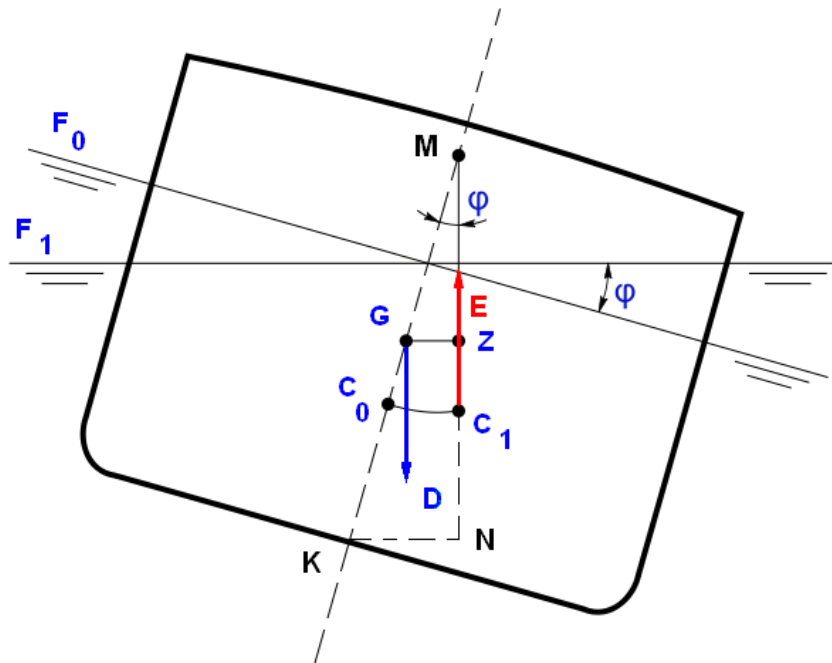


Ilustración 4 Representación esquemática de la estabilidad transversal del buque (Wikipedia, 2019)

Como puede verse, la altura metacéntrica es un parámetro fundamental para la estabilidad. Es por ello por lo que los sistemas de guía de la estabilidad de la nueva generación enfocan su funcionamiento en monitorizar en tiempo real este factor.

Si se considera el movimiento del roll como un grado de libertad del buque desacoplado del resto, este puede expresarse como (Santiago Caamaño et al., 2018):

$$(I_{xx} + A_{44}) \ddot{\phi} + B_{44} \dot{\phi} + g \Delta GM \phi = M_{ox} \quad (3.2)$$

siendo M_{ox} la excitación externa, I_{xx} el momento de inercia transversal del buque, A_{44} la masa añadida del roll y B_{44} el coeficiente de amortiguamiento del roll.

Considerando esto, y siendo g la aceleración de la gravedad, se puede estimar la frecuencia natural del balance, ω_0 , como (Santiago Caamaño et al., 2018):

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g \Delta GM}{I_{xx} + A_{44}}} \quad (3.3)$$

Reordenado:

$$GM = \frac{\omega_0^2 (I_{xx} + A_{44})}{g \Delta} \quad (3.4)$$

De esta forma, se ve que puede llegar a estimarse el valor de GM a partir del análisis de ω_0 y de otros parámetros. Además, si se aplica la fórmula de Weiss (Santiago Caamaño, 2019):

$$I_{xx} + A_{44} = k_{xx}^2 \Delta \quad (3.5)$$

$$GM = \frac{\omega_0^2 k_{xx}^2}{g} \quad (3.6)$$

donde k_{xx} es el radio de giro al balance del buque, el cual puede llegar a aproximarse como un 40% de la manga, dando unos resultados bastante válidos (Santiago Caamaño, 2019).

En base a este razonamiento, (M. Míguez González et al., 2017) propuso un sistema para evaluar la altura metacéntrica de un buque pesquero de forma automática y en tiempo real. Dicho sistema se basa en analizar el movimiento del roll del buque, el cual es recogido a través de una Unidad de Medición Inercial (IMU), y aplicarle la Transformada Rápida de Fourier, FFT, para obtener su espectro. Esta idea se basa en que un barco balanceándose sin excitaciones externas presentará en el espectro del roll un pico que, en condiciones ideales, aparecerá para ω_0 (o muy próximo en caso de que aparezcan fenómenos de amortiguamiento).

Este sistema se basa en dos puntos clave:

- **La Transformada Rápida de Fourier.** Es un algoritmo que permite computar la Transformada Directa de Fourier, DFT, que viene dada por la siguiente expresión (Santiago Caamaño, 2019):

$$X_m = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi mn/N}; m = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.7)$$

en la cual N es el número de computaciones de la DFT y x_n es la señal muestreada.

Se basa en la descomposición de los cálculos de la DFT de un vector dado en la aplicación de la DFT a vectores más pequeños (Santiago Caamaño, 2019). Además, para incrementar la simplicidad del proceso sin empeorar los resultados, primero se aplica la FFT a la señal original, $\phi(t)$, obteniéndose así como resultado la señal $g(\omega)$; y posteriormente se calcula la señal del

espectro de potencia, $S(\omega)$, como la media de los productos de cada $g(\omega)$ por su conjugado (Santiago Caamaño, 2019). Es decir:

$$g(\omega) = FFT(\phi(t)) \quad (3.8)$$

$$S(\omega) = \frac{|g(\omega)|^2}{n} \quad (3.9)$$

- **La aplicación recursiva de la FFT.** Uno de los inconvenientes de la FFT es que para obtener unos resultados aceptables necesita cierta resolución en la señal analizada, lo que se traduce en series temporales más largas. Sin embargo, si las series temporales son demasiado largas se está renunciando a la estimación en tiempo real de la estabilidad.

Como solución a este problema, se opta por realizar los cálculos de forma recursiva (M. Míguez González et al., 2017). El programa analiza series temporales de mayor duración (tiempo de análisis) espaciadas entre sí un determinado tiempo (tiempo de muestreo), de forma que se aplica la FFT a segmentos temporales lo suficientemente amplios como para ofrecer resultados válidos y, a la vez, se obtiene una evaluación de la estabilidad cada poco tiempo. Además, para reducir las posibles desviaciones entre resultados, se aplica una media móvil que considera los valores hasta cierto tiempo previo al último cálculo (tiempo de promediado). La Ilustración 5 muestra la metodología propuesta.

Siguiendo con trabajos anteriores en esta línea (Allegue García, 2020; Santiago Caamaño, 2019), se trabajará con 180 s de tiempo de análisis, 10 s de tiempo de muestreo y 120 s de tiempo de promediado (es decir, se promediarán los últimos 13 espectros obtenidos)¹.

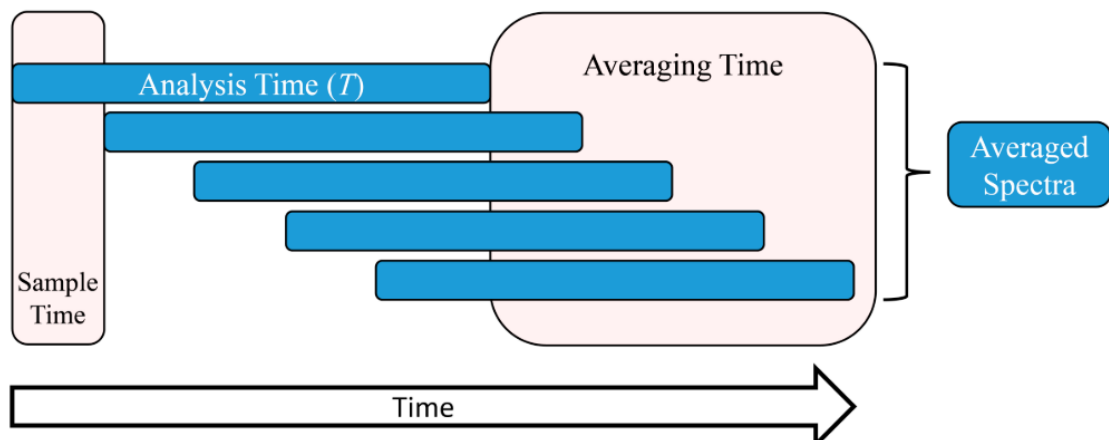


Ilustración 5 Esquema de la aplicación recursiva de la FFT (M. Míguez González et al., 2017)

El proceso que sigue el programa base para obtener la estimación de ω_0 en cada segmento de tiempo sería el siguiente:

1. **Aplicación de la FFT** a la señal del roll, obteniéndose así un espectro de potencia.

¹ Como se mencionará más adelante, en este estudio se trabaja con series temporales muy cortas, que en muchos casos no permiten hacer el promediado de 13 segmentos temporales, o incluso en casos aislados no permiten trabajar con 180 segundos para el primer segmento.

2. **Promediado del espectro**, mediante una media móvil que tome en cuenta el espectro del segmento temporal actual y el de los 12 segmentos anteriores (desfasados entre sí 10 s).
3. **Suavizado de la señal**, usando para ello la función *smooth* de Matlab. Esta función permite suavizar la señal mediante un filtro de promediado móvil. El programa trabaja abarcando 5 valores de la serie para hacer el suavizado de cada uno, según la siguiente expresión:

$$S_{smooth}(\omega_i) = \frac{S(\omega_{i-2}) + S(\omega_{i-1}) + S(\omega_i) + S(\omega_{i+1}) + S(\omega_{i+2})}{5} \quad (3.10)$$

4. **Ajuste de la señal** mediante el algoritmo genético.
5. **Cálculo de la frecuencia natural de balance estimada**, ω_0^* , como la frecuencia en la que se produce el máximo del espectro.

La funcionalidad de este sistema ha sido probada en varios estudios mediante modelos matemáticos, ensayos de modelos a escala en el canal de experiencias y en buques reales (Allegue García, 2020; Santiago Caamaño, 2019). Los resultados obtenidos en ellos son prometedores y apuntan a que el sistema puede llegar a ser viable y de aplicación. No obstante, también se observaron ciertas limitaciones. Una de las más destacables es el empeoramiento de los resultados cuando el movimiento del roll no experimenta grandes oscilaciones, o cuando el buque está lejos de encontrarse en una situación en la que pueda experimentar roll paramétrico. En estos casos, se observó que en el espectro del roll aparecen máximos asociados a otras fuentes de excitación, como son las olas con las que se encuentra el buque o el viento incidente. En estos casos suele suceder que el programa localiza el máximo del espectro en la frecuencia de encuentro del buque y las olas o en la frecuencia del viento incidente, de modo que toma ese valor como ω_0^* (Santiago Caamaño et al., 2019).

Como se ha dicho en el apartado anterior, el objetivo de este proyecto es ampliar el programa base que se acaba de describir para que sea capaz de distinguir la frecuencia de encuentro de las olas y la frecuencia natural del balance, y así obtener mejores resultados en la estimación de esta última.

3.3 La frecuencia de encuentro buque-olas

En el punto anterior se ha mencionado que, bajo ciertas condiciones de ola, en el espectro del roll aparecían máximos asociados a las olas o al viento incidente, y se observó que el espectro del roll presentaba su máximo valor no para la frecuencia natural del roll, sino para la frecuencia de encuentro del buque con las olas, ω_e , o para la frecuencia de incidencia del viento.

La frecuencia del oleaje tiene cierta influencia en el movimiento del buque. Sin embargo, lo que mayormente le afecta es la frecuencia con la que el buque se encuentra con las olas, esto es, la frecuencia de las olas relativa al barco (y no su frecuencia absoluta) (Lloyd, 1998).

Siguiendo el esquema representado en la Ilustración 6, se considera que λ es la longitud de la ola (distancia entre cresta y cresta, en m), c es su celeridad (m/s) y μ es el ángulo con el que incide sobre el buque. Por otro lado, U es la velocidad de avance del buque.

Con esto en mente, se puede extraer que el periodo de la ola (y, por consiguiente, su frecuencia) es (Lloyd, 1998):

$$T = \frac{\lambda}{c} \rightarrow f = \frac{c}{\lambda} \rightarrow \omega = \frac{2\pi c}{\lambda} [\text{rad/s}] \quad (3.11)$$

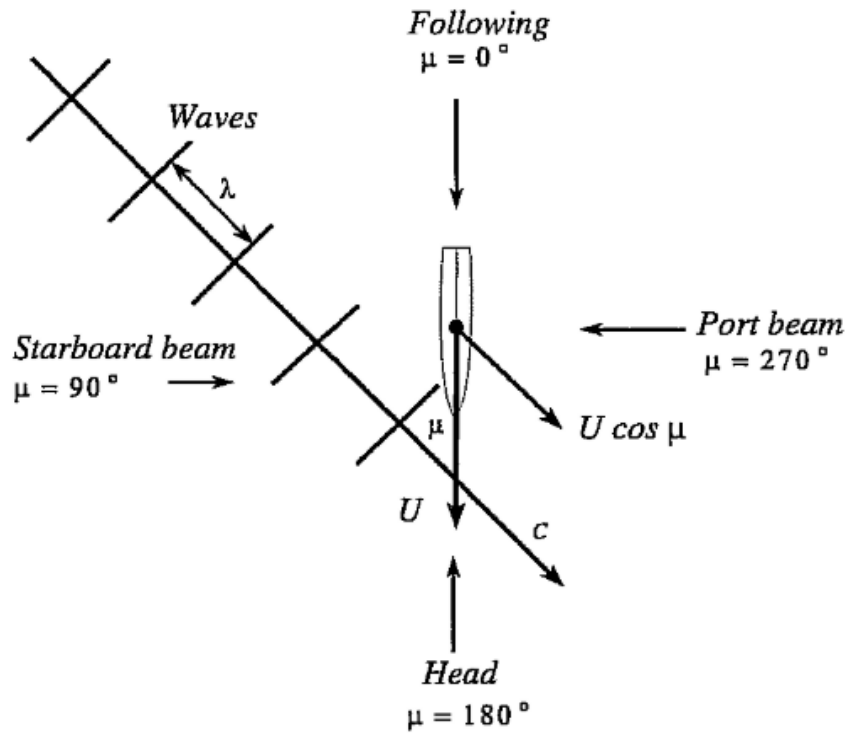


Ilustración 6 Definición de los ángulos de incidencia de las olas (Lloyd, 1998)

La componente de la velocidad del buque en la dirección de incidencia de la ola es $U \cos \mu$, por lo que las olas alcanzan al buque con una velocidad relativa de $c - U \cos \mu$. De esta forma, se define la frecuencia de encuentro de las olas con el buque, ω_e , como (Lloyd, 1998):

$$\omega_e = \frac{2\pi}{\lambda} (c - U \cos \mu) = \omega - \frac{2\pi}{\lambda} U \cos \mu \quad (3.12)$$

Para aguas profundas, esta expresión puede reescribirse de la siguiente forma, siendo g la aceleración de la gravedad (Lloyd, 1998):

$$\omega_{e,deep\ water} = \omega - k U \cos \mu = \omega - \frac{\omega^2 U}{g} \cos \mu \quad (3.13)$$

4 METODOLOGÍA

La metodología planteada en este proyecto es la siguiente:

1. En primer lugar, se realizan los ensayos del modelo del buque en el canal de experiencias. Para ello, se usa el modelo a escala de un buque pesquero ya empleado anteriormente en otras investigaciones relacionadas con el ámbito que nos ocupa, y se realizan varias pruebas en el canal de experiencias de la EPS de Ferrol. Se realizan un total de 32 ensayos con olas regulares, con distintas combinaciones de periodo, altura y dirección de incidencia de las olas, y se recogen datos de ángulos y aceleraciones en los tres grados de libertad del barco.
2. Una vez realizados los ensayos, se pasa al procesamiento de los datos. En esta etapa se busca extraer las series de datos obtenidos y procesarlas para emplearlas posteriormente. Esto incluye eliminar el posible offset que presenten las señales, recortar la señal para eliminar el transitorio y el retroceso de la ola en el canal y la transformación de los datos de escala del modelo a escala del buque real.
3. A continuación, se procede a la aplicación de la FFT a las series temporales del pitch y de a_z para estudiar sus respectivos espectros. El objetivo de este paso es obtener un valor estimado de la frecuencia de encuentro, ω_e^* , y compararlo con el valor real de ω_e . De esta forma se pretende comprobar la viabilidad de ambas vías como método de estimación, así como cuál de las dos presenta mejores resultados.
4. Para terminar, se buscará adaptar el algoritmo desarrollado para la estimación de ω_0 para intentar filtrar la frecuencia de encuentro, utilizando el valor de ω_e^* , y así mejorar los resultados del programa original. Una vez hecho esto, se busca comparar los resultados con y sin filtrado para comprobar la validez del método.

5 ENSAYOS

5.1 Descripción del modelo

La Ilustración 7 y la

Tabla 2 muestran el modelo de buque empleado para los ensayos, el cual ha sido usado anteriormente en el desarrollo del programa para evaluar la estabilidad transversal. Este modelo se corresponde con un buque pesquero real, de dos cubiertas y rampa de popa, con una relación de escala 1:30. Las relaciones escala real – escala modelo para longitudes, masas y tiempos son, respectivamente, las siguientes:

$$d_{real} = e \times d_{modelo} \quad (5.1)$$

$$m_{real} = e^3 \times m_{modelo} \quad (5.2)$$

$$t_{real} = \sqrt{e} \times t_{modelo} \quad (5.3)$$

Tabla 2 Parámetros del buque

Parámetros	Buque real	Modelo (e=1:30)
L_{OA}	34.50 m	1.15 m
L_{PP}	29.00 m	0.97 m
$B_{Trazado}$	8.00 m	0.27 m
$D_{Main\ deck}$	3.65 m	0.12 m
$D_{Upper\ deck}$	5.80 m	0.19 m
$T_{Diseño}$	3.60 m	0.12 m

Para la obtención de los datos del ensayo se instala en el modelo una Unidad de Medición Inercial (IMU), la cual hace mediciones cada cierto tiempo de orientación, velocidad y aceleración en los tres ejes del modelo. Para el caso que nos ocupa, la frecuencia de muestreo de la IMU es de 40 Hz (40 muestras/s), y posteriormente se trabajará con los datos de roll, pitch y aceleración vertical, a_z . El dispositivo se instala sobre la cubierta principal del modelo, dentro de un recipiente estanco para evitar que se moje (ver Ilustración 7).

Para la realización de los ensayos es necesario definir una condición de carga. Se opta por realizar el estudio en base a una de las condiciones de carga empleadas en estudios previos, ya que se cuenta con suficiente información para recrearla con más precisión; además, se trabaja con la condición de carga crítica, esto es, la que presenta la altura metacéntrica mínima exigida por la normativa para que el buque se considere estable (Santiago Caamaño et al., 2019).

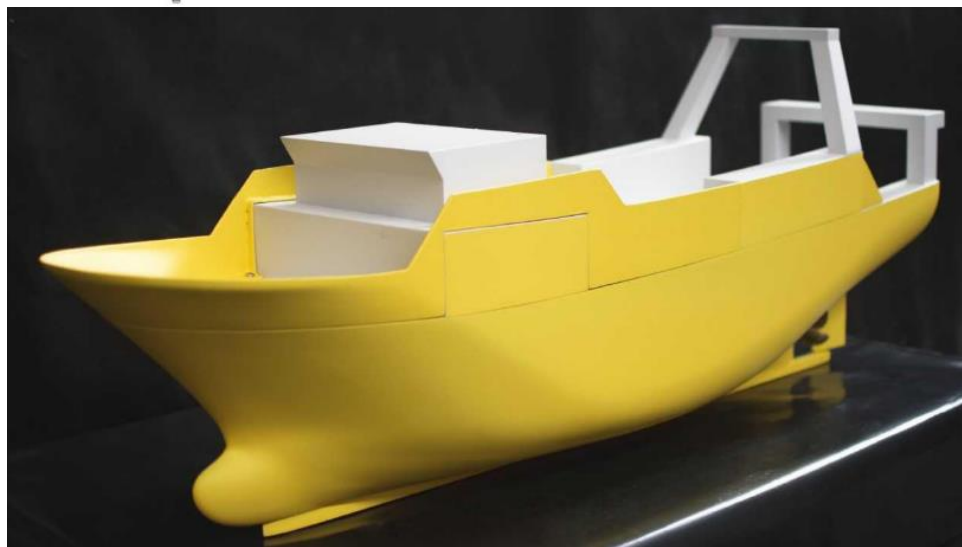
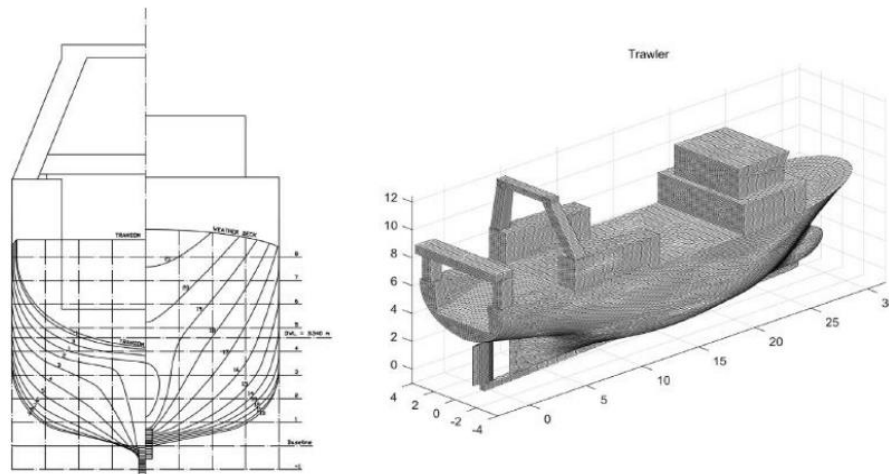


Ilustración 7 Modelo del buque. Arriba: caja de cuadernas y modelo matemático (Allegue García, 2020). Abajo: modelo empleado en los ensayos de canal (Santiago Caamaño, 2019)

El proceso para ajustar la condición de carga elegida en el modelo es el siguiente:

1. **Ajuste del desplazamiento.** En primer lugar, es necesario conseguir que el peso del modelo se corresponda con el del buque real en la condición de carga elegida. Para ello, se pesa el modelo junto con todo el equipo requerido para los ensayos (tornillos del cierre de la tapa, IMU y su soporte y recipiente hermético que contendrá la IMU). Posteriormente se añadirán distintas pesas que harán de lastre hasta alcanzar el peso requerido.
2. **Ajuste del GM .** Es necesario que la altura del centro de gravedad del modelo se corresponda con la del buque real en la condición de carga estudiada. Esto se consigue mediante una prueba de estabilidad: una vez se han distribuido los pesos, el modelo se introduce en un tanque sin olas y se coloca un peso de masa conocida sobre la cubierta, de forma que no genere una escora. A continuación, siempre manteniendo el agua del tanque lo más estática que sea posible, se desplaza el peso adicional una distancia conocida a una banda para generar una pequeña escora. Esto se aplica varias veces hacia ambas bandas, obteniendo una serie de datos de desplazamientos del peso y escoras que permiten deducir el GM del modelo de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$GM_1 = \frac{p \times d}{(\Delta + p) \times \tan \varphi} \quad (5.4)$$

$$GM = GM_1 + \frac{p \times Kg}{\Delta} \quad (5.5)$$

donde Δ es el desplazamiento del modelo, p es el peso empleado para el ensayo, Kg es la altura a la que se coloca el peso respecto de la quilla, d es la distancia transversal que se desplaza el peso y φ es la escora.

3. **Ajuste de ω_0 .** Una vez se han realizado los ajustes previamente descritos, se realiza un ensayo de extinción del roll para comprobar que la ω_0 del modelo se corresponde con la de la condición de carga del buque real. Para ello, se introduce el modelo en un tanque como el de la experiencia de estabilidad, se le fuerza una escora y se suelta de golpe. Analizando la señal de roll mediante la IMU se obtendrá una gráfica como la que se muestra en la Ilustración 8. En este tipo de ensayos, el tiempo que transcurre entre dos máximos locales de la señal corresponde al valor del periodo de resonancia del modelo, T_0 , de modo que:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi/T_0 \quad (5.6)$$

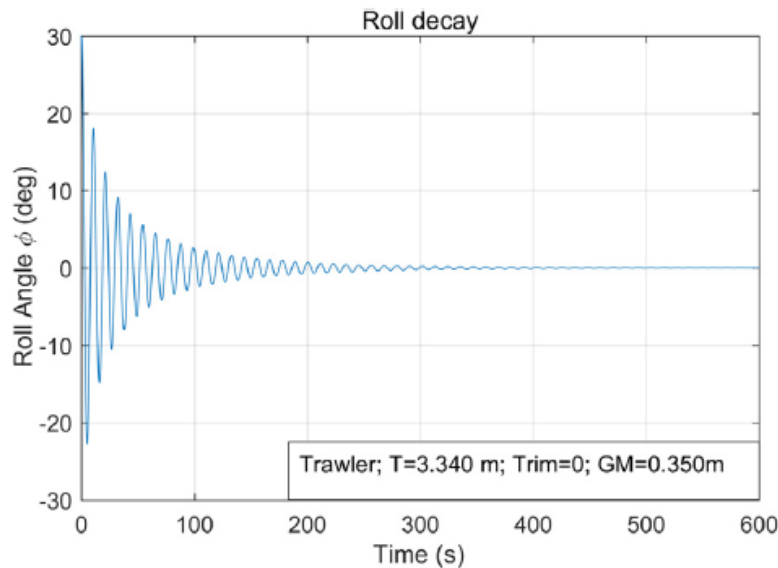


Ilustración 8 Ejemplo de señal del roll en un ensayo de extinción (Santiago Caamaño et al., 2019)

La Tabla 3 recoge los parámetros de la condición de carga. Se muestran tanto los valores objetivo de estos como los valores obtenidos en el modelo estudiado (y su correspondiente valor a escala real).

Tabla 3 Condición de carga empleada en el estudio

Parámetros LC	Valores objetivo		Valores reales	
	Buque	Modelo	Buque	Modelo
Δ	448 t	16.593 kg	448.929 t	16.627 kg
GM	0.35 m	0.012 m	0.351m	0.012 m
ω_0	0.563 rad/s	3.084 rad/s	0.560 rad/s	3.069 rad/s
T_0	11.160 s	2.038 s	11.212 s	2.047 s

5.2 Análisis de las condiciones de ola

Se ha optado por realizar los ensayos con trenes de olas regulares, en distintas combinaciones de altura (H_w), periodo (T_w) y dirección de incidencia de la ola (α_w). Estos dos primeros parámetros se ven condicionados por la capacidad del generador de olas del canal de experiencias, ya que presenta limitaciones en las olas que puede generar.

De esta forma, se consideran los siguientes valores de cada parámetro:

- Altura de ola, H_w : se trabajarán con dos alturas de ola en este proyecto: 0.06 m y 0.10 m (lo que se traduce en 1.8 m y 3.0 m a escala real, respectivamente).
- Periodo de ola, T_w : se generarán en el canal trenes de ola con periodos comprendidos entre 1 y 2.4 s, a intervalos regulares de 0.2 s entre ellos. A escala real, esto se traduce en periodos de 5.477 y 13.145 s, a intervalos de 1.095 s.

Como se mencionará en el siguiente apartado, los ensayos se realizarán con el buque a velocidad 0. Esto se traduce en que la frecuencia de las olas y la frecuencia de encuentro del buque con estas coinciden (ver ecuación (3.12)). Por tanto, nos encontramos con que se van a estudiar condiciones de ola con ω_e comprendida entre 1.147 y 0.478 rad/s, lo que significa que se está trabajando con frecuencias de encuentro tanto por debajo como por encima de ω_0 . De este modo se podrá evaluar los efectos de distintas frecuencias de encuentro en la metodología propuesta.

- Ángulo de incidencia, α_w : se estudiarán únicamente olas de costado ($\alpha_w = 90^\circ$) y olas de proa ($\alpha_w = 180^\circ$).

De esta forma, se alcanzan hasta 32 ensayos con distintos trenes de ola (ver Tabla 4).

Tabla 4 Matriz de ensayos (escala real y escala modelo)

T_w (s)	ω_e (rad/s)	$\alpha_w = 90^\circ$		$\alpha_w = 180^\circ$	
		$H_w = 1.8\text{ m}$ (0.06)	$H_w = 3.0\text{ m}$ (0.10)	$H_w = 1.8\text{ m}$ (0.06)	$H_w = 3.0\text{ m}$ (0.10)
5,477 (1)	1,147 (6,283)	Ensayo 1	Ensayo 9	Ensayo 17	Ensayo 25
6,573 (1,2)	0,956 (5,236)	Ensayo 2	Ensayo 10	Ensayo 18	Ensayo 26
7,668 (1,4)	0,819 (4,488)	Ensayo 3	Ensayo 11	Ensayo 19	Ensayo 27
8,764 (1,6)	0,717 (3,927)	Ensayo 4	Ensayo 12	Ensayo 20	Ensayo 28
9,859 (1,8)	0,637 (3,491)	Ensayo 5	Ensayo 13	Ensayo 21	Ensayo 29
10,954 (2)	0,574 (3,142)	Ensayo 6	Ensayo 14	Ensayo 22	Ensayo 30
12,050 (2,2)	0,521 (2,856)	Ensayo 7	Ensayo 15	Ensayo 23	Ensayo 31
13,145 (2,4)	0,478 (2,618)	Ensayo 8	Ensayo 16	Ensayo 24	Ensayo 32

5.3 Planteamiento y realización de los ensayos

Los ensayos se realizan en el canal de experiencias hidrodinámicas de la Universidade da Coruña. Este tiene una longitud de 56 m, una anchura de 4.20 m, 1.80 m de profundidad y cuenta con un generador de olas unidireccional.

Los ensayos se realizarán con el modelo a velocidad 0, ya que el canal no tiene suficiente longitud como para realizar un ensayo con el modelo propulsado y conseguir a la vez series de datos de duración adecuada para los cálculos. Por esta misma razón, el modelo será ubicado en una zona próxima a la pala del generador de olas (para asegurar series de datos suficientemente largas antes de que el retroceso del tren de olas interfiera con la ola generada).

El modelo estará unido por la roda y el codaste a unos cabos, que servirán para amarrarlo a ambos laterales del canal con el fin de mantener su orientación y posición. No obstante, se dejarán sin tirantez, para evitar interferencias en las mediciones. Para los ensayos con $\alpha_w = 90^\circ$ (ensayos 1-16) se trabajarán con olas incidiendo desde la banda de estribor, mientras que para $\alpha_w = 180^\circ$ (ensayos 17-32) las olas incidirán desde proa.

Para cada ensayo se emplearán las IMU para extraer series temporales de ángulos de roll y pitch y series de aceleración vertical. Estas dos primeras vienen dadas en grados sexagesimales, mientras que la aceleración se da en m/s^2 .

Para terminar, cabe destacar que al inicio de los ensayos con olas de proa se fuerza una escora momentánea del modelo y luego se deja libre para que interactúe con el tren de olas. Esto se hace así para asegurar que, en caso de que el modelo vaya a experimentar resonancia paramétrica para la condición de ola del ensayo, este fenómeno suceda más rápidamente.



Ilustración 9 Vista del canal de experiencias (Santiago Caamaño, 2019)

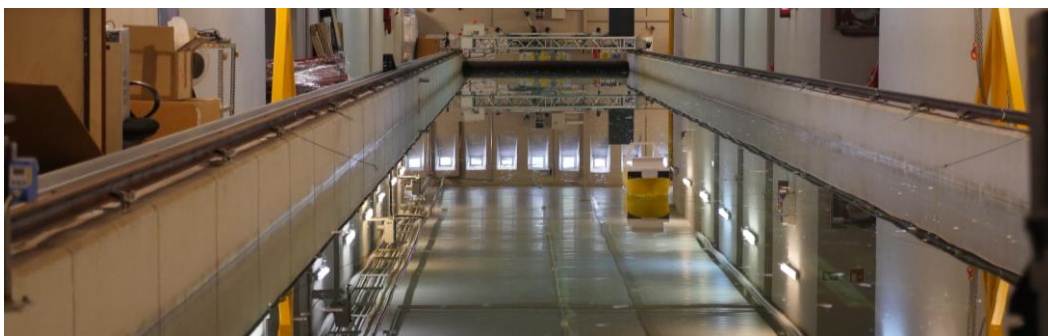


Ilustración 10 Posicionamiento del modelo durante los ensayos con olas de costado (arriba) y con olas de proa (abajo)

5.4 Procesado de datos

Una vez realizados los ensayos, se pasa a extraer las series de datos de interés para el estudio y a preparar las mismas para su análisis.

En primer lugar, caben destacar las siguientes anomalías:

- Fue necesario repetir el ensayo 4, ya que se observó que había una pérdida de datos en la IMU instalada. Tras realizar varios intentos se consiguió solucionar y se continuó de forma normal. Se comprobaron los datos extraídos de los ensayos previos y se controlaron los siguientes, pero se vio que no experimentaban ese error.
- Durante el ensayo 5 se activó accidentalmente la IMU de repuesto que no estaba instalada en el modelo, por lo que se generaron dos archivos de datos para el mismo ensayo. Al analizar los datos se observó claramente cuál era el archivo correcto.
- Al procesar los datos de todos los ensayos se observó que los referentes al ensayo 19 estaban incompletos y no eran válidos para analizar. Por falta de tiempo no se pudo repetir el ensayo.
- Fue necesario repetir el ensayo 29 debido a un error a la hora de programar la ola generada.

El procesado de los datos se realiza mediante MATLAB, y se compone de las siguientes fases (ver Ilustración 11):

1. **Generación del vector tiempo.** Considerando que la IMU se programó para trabajar a una frecuencia de muestreo (f_s) de 40 Hz, se genera un vector de tiempo del mismo tamaño que las series de datos del ensayo correspondiente, el cual comienza en 0 s y tiene un incremento de tiempo en cada término sucesivo de $\Delta t = 1/40 \text{ Hz} = 0.025 \text{ s}$.
2. **Ajuste a cero de las señales.** Las señales de roll y de pitch deberían ser señales oscilatorias alrededor de la posición de equilibrio, esto es, de 0. No obstante, es común que la señal extraída de la IMU presente cierto offset. Para eliminar este offset, se opta por restar a la señal original el promedio de esta:

$$f_{ajust}(t) = f(t) - \overline{f(t)} \quad (5.7)$$

Cabe destacar que, entre las señales objeto de este estudio, sólo las del roll y el pitch deberían oscilar en torno a 0, mientras que la señal de a_z debería hacerlo en torno al valor de la aceleración de la gravedad, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$. No obstante, se ajusta de la misma forma que las otras dos para poder aplicar la FFT posteriormente.

3. **Recorte de la señal.** Para este proyecto interesa únicamente estudiar la fase estacionaria de las señales a analizar. No interesa estudiar el transitorio inicial, cuando el modelo comienza a oscilar al alcanzarle el inicio del tren de olas; del mismo modo que no interesa la zona final de las señales, cuando el retroceso de la ola alcanza al modelo e interfiere con la ola deseada. Por otro lado, es conveniente que la zona estudiada sea lo más grande posible, ya que de este modo se obtienen unos resultados más fiables.

Teniendo esto en mente:

- a. Para los ensayos con olas de costado, se han tomado franjas de tiempo en las cuales la señal del roll pasaba a tener un carácter estacionario, así como la del pitch.
- b. En lo que se refiere a los ensayos con olas de proa, se han tomado franjas temporales en las que el pitch alcanzaba una oscilación más o menos constante, aunque eso significara que la señal del roll presentara algunas oscilaciones iniciales más grandes que en el resto

del tiempo (estas oscilaciones son las provocadas por la escora inicial forzada en estos ensayos).

4. **Escalado de los datos.** Para realizar los cálculos y análisis se va a trabajar en la escala real, y no en la del modelo. Por tanto, es necesario realizar el ajuste de los datos. De esta forma:

- a. **El tiempo** se ajusta mediante la ecuación (5.3). Además, se ajusta para que inicie en 0 s.
- b. **El roll y el pitch**, al ser parámetros angulares, no requieren ser escalados. Lo único que se hace es cambiar sus unidades, de grados sexagesimales a radianes.
- c. **La aceleración** no requiere ser escalada, ya que considerando las ecuaciones (5.1) y (5.3):

$$[a_z]_{real} = \frac{[d]_{real}}{[t]_{real}^2} = \frac{e \times [d]_{modelo}}{(\sqrt{e} \times [t]_{modelo})^2} \Rightarrow [a_z]_{real} = [a_z]_{modelo} \quad (5.8)$$

La Ilustración 11 muestra un ejemplo gráfico de cómo evolucionarían las señales de interés de uno de los ensayos. Así mismo, la Tabla 5 presenta los ensayos con los que se ha trabajado en este proyecto, así como los intervalos de tiempo que se han considerado en cada uno de ellos. Finalmente, se pueden encontrar las gráficas con los datos procesados de cada ensayo en el Anexo 1.

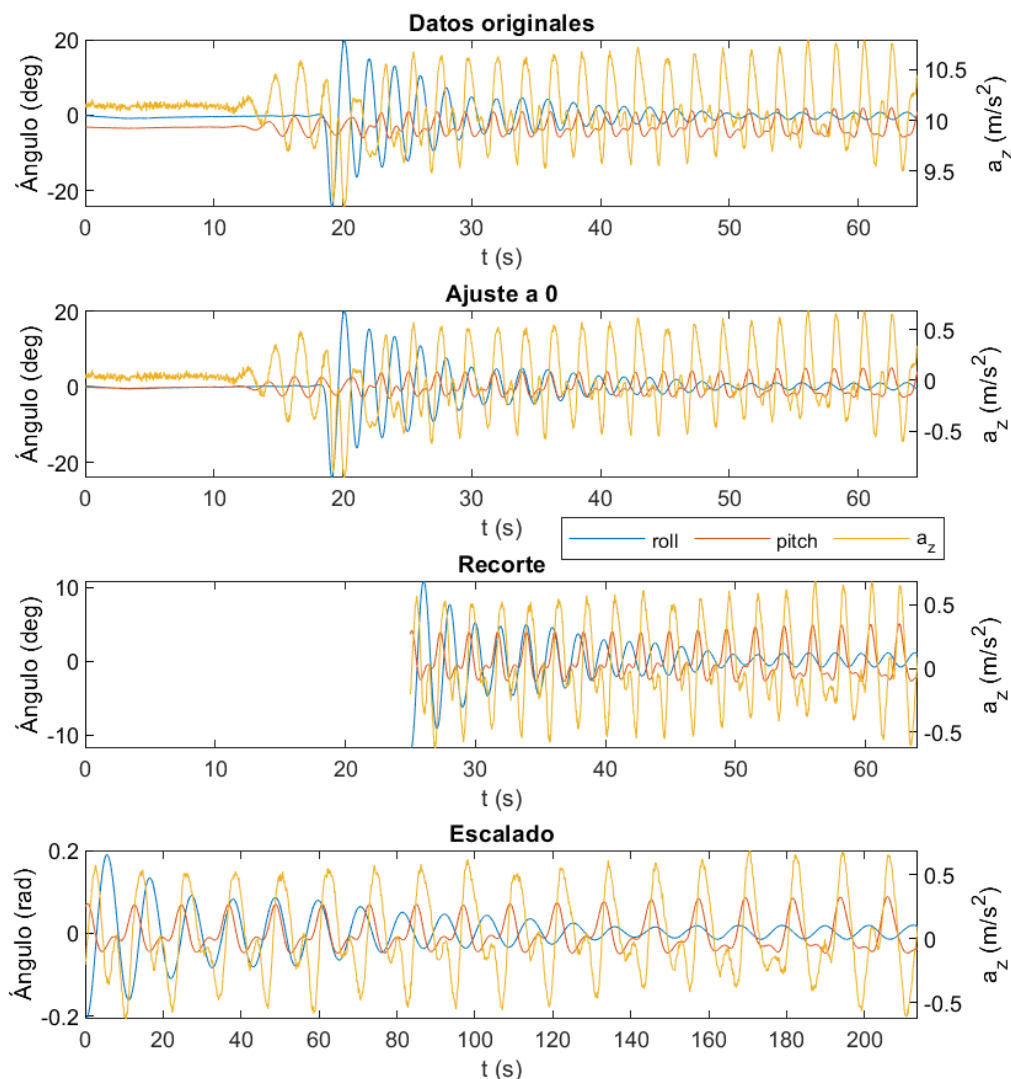


Ilustración 11 Ejemplo de procesamiento de señales

Tabla 5 Ensayos válidos y ajuste temporal (escala real)

Ensayo	Límites del recorte (s)		Δt (s)	Ensayo	Límites del recorte (s)		Δt (s)
'ensayo01'	164,32	328,63	164,32	'ensayo17'	219,09	509,38	290,29
'ensayo02'	136,93	328,63	191,70	'ensayo18'	164,32	432,70	268,38
'ensayo03'	109,54	383,41	273,86				
'ensayo04-3'	136,93	383,41	246,48	'ensayo20'	136,93	361,50	224,57
'ensayo05-1'	136,93	328,63	191,70	'ensayo21'	136,93	372,45	235,52
'ensayo06'	164,32	328,63	164,32	'ensayo22'	136,93	334,11	197,18
'ensayo07'	109,54	323,16	213,61	'ensayo23'	136,93	345,07	208,13
'ensayo08'	136,93	301,25	164,32	'ensayo24'	136,93	345,07	208,13
'ensayo09'	164,32	301,25	136,93	'ensayo25'	164,32	525,81	361,50
'ensayo10'	109,54	356,02	246,48	'ensayo26'	136,93	465,56	328,63
'ensayo11'	164,32	383,41	219,09	'ensayo27'	136,93	438,18	301,25
'ensayo12'	164,32	328,63	164,32	'ensayo28'	136,93	388,88	251,95
'ensayo13'	136,93	334,11	197,18	'ensayo29-2'	136,93	356,02	219,09
'ensayo14'	115,02	272,77	157,74	'ensayo30'	301,25	498,43	197,18
'ensayo15'	109,54	235,52	125,98	'ensayo31'	136,93	350,54	213,61
'ensayo16'	136,93	290,29	153,36	'ensayo32'	136,93	328,63	191,70

6 RESULTADOS

6.1 Resultados de la estimación de la frecuencia de encuentro

En este apartado se van a presentar los resultados obtenidos a la hora de analizar las señales de pitch y de a_z , y se estudiará la validez de cada criterio a la hora de estimar el valor de la frecuencia de encuentro, que posteriormente se usará para mejorar los algoritmos de estimación de la estabilidad transversal.

Para cada ensayo (considerando que las series de datos ya se han procesado) y cada método (pitch y a_z) se seguirá el siguiente orden:

1. **Aplicación de la FFT a la señal estudiada.** Este cálculo se realiza aprovechando parte del programa ya desarrollado para la evaluación de la frecuencia natural, tal y como se ha explicado en el apartado 3.2 y según las expresiones (3.8) y (3.9).
2. **Primera estimación de la frecuencia de encuentro.** A partir del espectro obtenido en el paso anterior, se busca el valor máximo de la gráfica, y se toma la frecuencia en la que toma este valor como una primera estimación de la frecuencia de encuentro, ω_e^* .
3. **Ajuste gaussiano de la señal.** Uno de los objetivos del sistema que se está intentando desarrollar es que sirva para la estimación de la estabilidad en tiempo real. Esto se traduce que el programa tiene que calcular el GM (y, por tanto, ω_0 y ω_e^*) cada poco tiempo, por lo que la duración de la señal empleada es pequeña (de base se está trabajando con una señal de 180 s de duración como máximo) (Santiago Caamaño, 2019). Por tanto, la señal obtenida en el paso 1 podría tener una baja resolución, que se traduciría en una mala estimación de la frecuencia de encuentro. Una posible solución a esto es realizar un ajuste gaussiano de la señal, para suavizarla y mejorar la resolución. Partiendo de parte del programa base, se aplica un ajuste a la señal mediante un modelo paramétrico basado en la superposición de 3 funciones gaussianas² (M. Míguez González et al., 2017)
4. **Nueva estimación de la frecuencia de encuentro.** Finalmente, a partir del nuevo espectro se obtiene, de forma análoga al paso 2, un valor de ω_e^* .

Como se ve, para cada ensayo se obtienen un total de 4 estimaciones de la frecuencia de encuentro, ya que se aplican dos métodos distintos (pitch y a_z), calculándose para cada uno de ellos dos ω_e^* (sin ajuste gaussiano y con él). La Ilustración 12 muestra como ejemplo los resultados obtenidos al calcular los espectros para uno de los ensayos. Así mismo, en el Anexo 1 se encuentran los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos.

² En el programa base se empleaba un ajuste de este tipo porque se usó en estimaciones con modelo matemático en las que se aplicaba también viento, por lo que en el espectro estudiado era esperable que aparecieran tres picos, asociados a ω_e , ω_0 y al propio viento. Aunque en el proyecto presente no se ha trabajado con viento, se ha seguido con este ajuste para que sirva para futuros estudios donde sí se aplique.

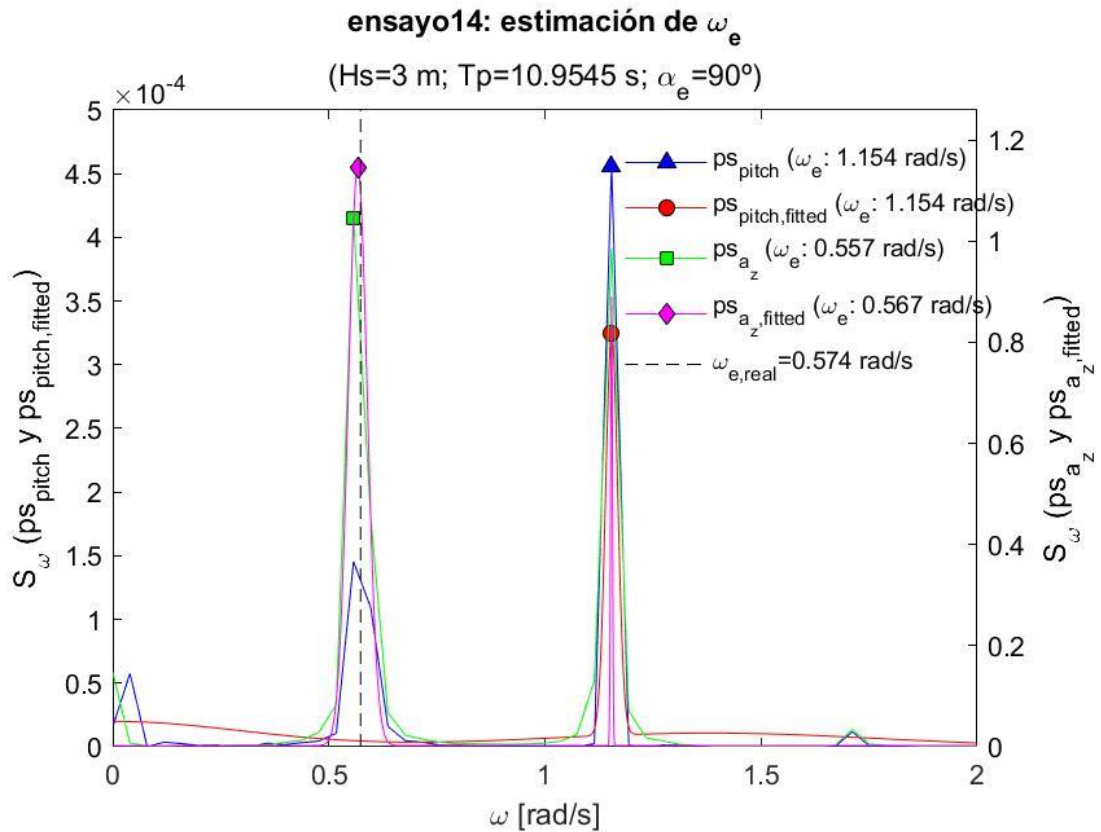


Ilustración 12 Ejemplo de los resultados obtenidos en la estimación de ω_e en uno de los ensayos

A continuación, se presentan varias tablas y gráficas resumen con los resultados de todos los ensayos.

- En primer lugar, se muestran los resultados numéricos de cada ensayo repartidos entre la Tabla 6, la Tabla 7, la Tabla 8 y la Tabla 9. En ellas se muestran, agrupados por alturas de ola y dirección de incidencia, tanto el valor real de ω_e de cada ensayo como los valores estimados por cada método, así como el error que supone cada estimación en tanto por ciento respecto al valor original, calculado como:

$$\epsilon_{\text{método } i} [\%] = 100 \times \frac{\omega_{e,\text{método } i}^* - \omega_e}{\omega_e} \quad (6.1)$$

- A continuación, la Ilustración 13 muestra los valores estimados de ω_e en cada ensayo frente al valor real de esta. Cada gráfica aglutina los resultados de los ensayos con igual altura de ola y dirección de incidencia de esta, y los distintos estilos de marcador muestran el valor de ω_e^* obtenidos por cada método. La línea de puntos refleja los valores reales de ω_e de cada ensayo. Por tanto, cuanto más cerca esté un marcador de la línea puntuada, más exacto es el valor de ω_e^* . Además, que el marcador esté por encima o por debajo de la línea indica que se comete una sobreestimación o una subestimación, según corresponda.
- Así mismo, la Ilustración 14 muestra el error cometido en cada ensayo, según la expresión (6.1). Cada una de las gráficas agrupa los errores de las estimaciones en cada ensayo, agrupadas por método de estimación. Puede observarse que en la ventana del gráfico no aparecen visibles todos los ensayos, ya que se ha limitado el eje y a errores entre el -5% y el 5%. Se ha hecho así porque se ha observado que las estimaciones con errores fuera de

este rango no pueden considerarse válidas (suponen errores de en torno al 100%). Se considera más interesante la comparativa que pueda hacerse entre los errores de los distintos métodos dentro del rango mostrado.

Tabla 6 Resultados de la estimación de ω_e : ensayo 1-8

Ensayos 1-8 ($H = 1.8 \text{ m}$; $\alpha = 90$)									
E	$\omega_{e.real}$ (rad/s)	$\omega_{e.pitch}^*$ (rad/s)	ϵ_{pitch}	$\omega_{e.pitch fit}^*$ (rad/s)	$\epsilon_{pitch fit}$	$\omega_{e.a_z}^*$ (rad/s)	ϵ_{a_z}	$\omega_{e.a_z fit}^*$ (rad/s)	$\epsilon_{a_z fit}$
1	1.147	1.146	-0.08%	1.146	-0.10%	1.146	-0.01%	1.147	-0.01%
2	0.956	0.950	-0.64%	0.958	0.21%	0.950	-0.62%	0.950	-0.62%
3	0.819	1.628	98.70%	1.632	99.17%	0.826	0.68%	0.825	0.68%
4	0.717	0.713	-0.50%	0.713	-0.55%	0.713	-0.27%	0.715	-0.27%
5	0.637	1.277	100.43%	1.278	100.53%	0.622	-0.52%	0.634	-0.52%
6	0.574	1.146	99.83%	1.146	99.80%	0.573	-0.10%	0.573	-0.10%
7	0.521	1.051	101.53%	1.056	102.52%	0.509	-1.62%	0.513	-1.62%
8	0.478	0.497	3.91%	0.482	0.84%	0.497	1.89%	0.487	1.89%

Tabla 7 Resultados de la estimación de ω_e : ensayos 9-16

Ensayos 9-16 ($H = 3.0 \text{ m}$; $\alpha = 90$)									
E	$\omega_{e.real}$ (rad/s)	$\omega_{e.pitch}^*$ (rad/s)	ϵ_{pitch}	$\omega_{e.pitch fit}^*$ (rad/s)	$\epsilon_{pitch fit}$	$\omega_{e.a_z}^*$ (rad/s)	ϵ_{a_z}	$\omega_{e.a_z fit}^*$ (rad/s)	$\epsilon_{a_z fit}$
9	1.147	1.146	-0.10%	1.152	0.42%	1.146	0.16%	1.149	0.16%
10	0.956	0.968	1.28%	0.961	0.53%	0.968	0.21%	0.958	0.21%
11	0.819	1.634	99.38%	1.633	99.29%	0.831	0.56%	0.824	0.56%
12	0.717	1.452	102.50%	1.440	100.85%	0.726	1.26%	0.726	1.26%
13	0.637	1.274	99.86%	1.274	99.90%	0.637	-0.05%	0.637	-0.05%
14	0.574	1.154	101.21%	1.154	101.19%	0.557	-1.15%	0.567	-1.15%
15	0.521	0.498	-4.45%	0.514	-1.43%	1.046	100.60%	1.046	100.60%
16	0.478	0.491	2.77%	0.480	0.42%	0.491	2.31%	0.489	2.31%

Tabla 8 Resultados de la estimación de ω_e : ensayo 17-24

Ensayos 17-24 ($H = 1.8\text{ m}$; $\alpha = 180$)									
E	$\omega_{e.real}$ (rad/s)	$\omega_{e.pitch}^*$ (rad/s)	ϵ_{pitch}	$\omega_{e.pitch\ fit}^*$ (rad/s)	$\epsilon_{pitch\ fit}$	$\omega_{e.a_z}^*$ (rad/s)	ϵ_{a_z}	$\omega_{e.a_z\ fit}^*$ (rad/s)	$\epsilon_{a_z\ fit}$
17	1.147	1.147	-0.05%	1.148	0.07%	1.147	-0.01%	1.147	-0.01%
18	0.956	0.959	0.36%	0.959	0.32%	0.959	0.32%	0.959	0.32%
20	0.717	0.727	1.40%	0.724	0.98%	0.727	0.98%	0.724	0.98%
21	0.637	0.640	0.41%	0.640	0.42%	0.640	0.27%	0.639	0.27%
22	0.574	0.573	-0.07%	0.569	-0.80%	0.573	-0.10%	0.573	-0.10%
23	0.521	0.513	-1.64%	0.512	-1.81%	0.513	-0.08%	0.521	-0.08%
24	0.478	0.483	0.99%	0.483	1.05%	0.483	0.84%	0.482	0.84%

Tabla 9 Resultados de la estimación de ω_e : ensayo 25-32

Ensayos 25-32 ($H = 3.0\text{ m}$; $\alpha = 180$)									
E	$\omega_{e.real}$ (rad/s)	$\omega_{e.pitch}^*$ (rad/s)	ϵ_{pitch}	$\omega_{e.pitch\ fit}^*$ (rad/s)	$\epsilon_{pitch\ fit}$	$\omega_{e.a_z}^*$ (rad/s)	ϵ_{a_z}	$\omega_{e.a_z\ fit}^*$ (rad/s)	$\epsilon_{a_z\ fit}$
25	1.147	1.147	-0.04%	1.147	-0.01%	1.147	-0.01%	1.147	-0.01%
26	0.956	0.956	-0.04%	0.955	-0.10%	0.956	0.00%	0.956	0.00%
27	0.819	0.813	-0.77%	0.814	-0.66%	0.813	-0.66%	0.814	-0.66%
28	0.717	0.723	0.81%	0.721	0.56%	0.723	0.70%	0.722	0.70%
29	0.637	0.631	-1.06%	0.634	-0.52%	0.631	-0.99%	0.631	-0.99%
30	0.574	0.574	0.00%	0.573	-0.10%	0.574	0.07%	0.574	0.07%
31	0.521	0.529	1.47%	0.524	0.49%	0.529	1.45%	0.529	1.45%
32	0.478	0.491	2.78%	0.491	2.72%	0.950	-1.25%	0.472	-1.25%

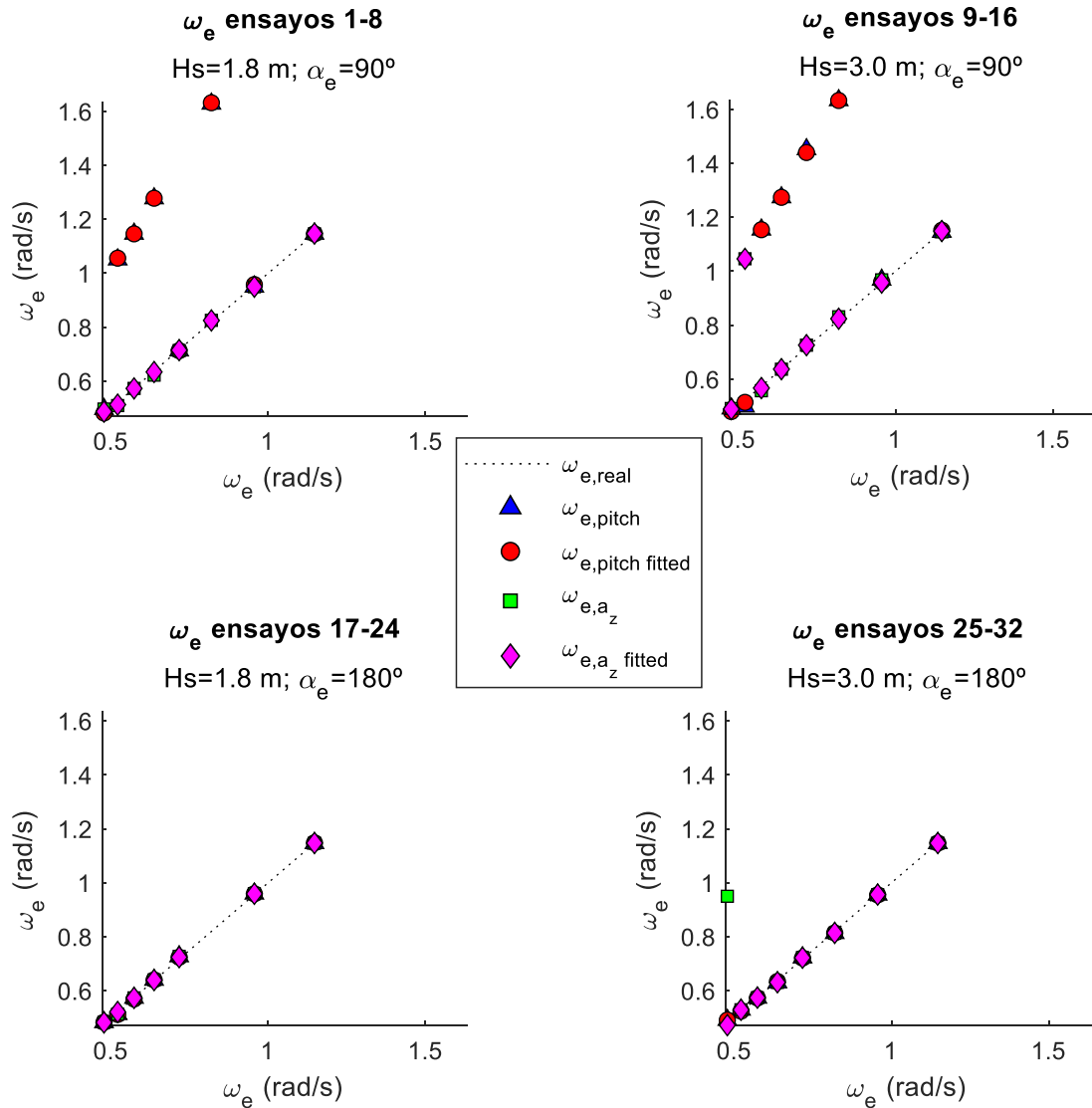


Ilustración 13 Resultados de las estimaciones de ω_e agrupados por tipos de ensayos

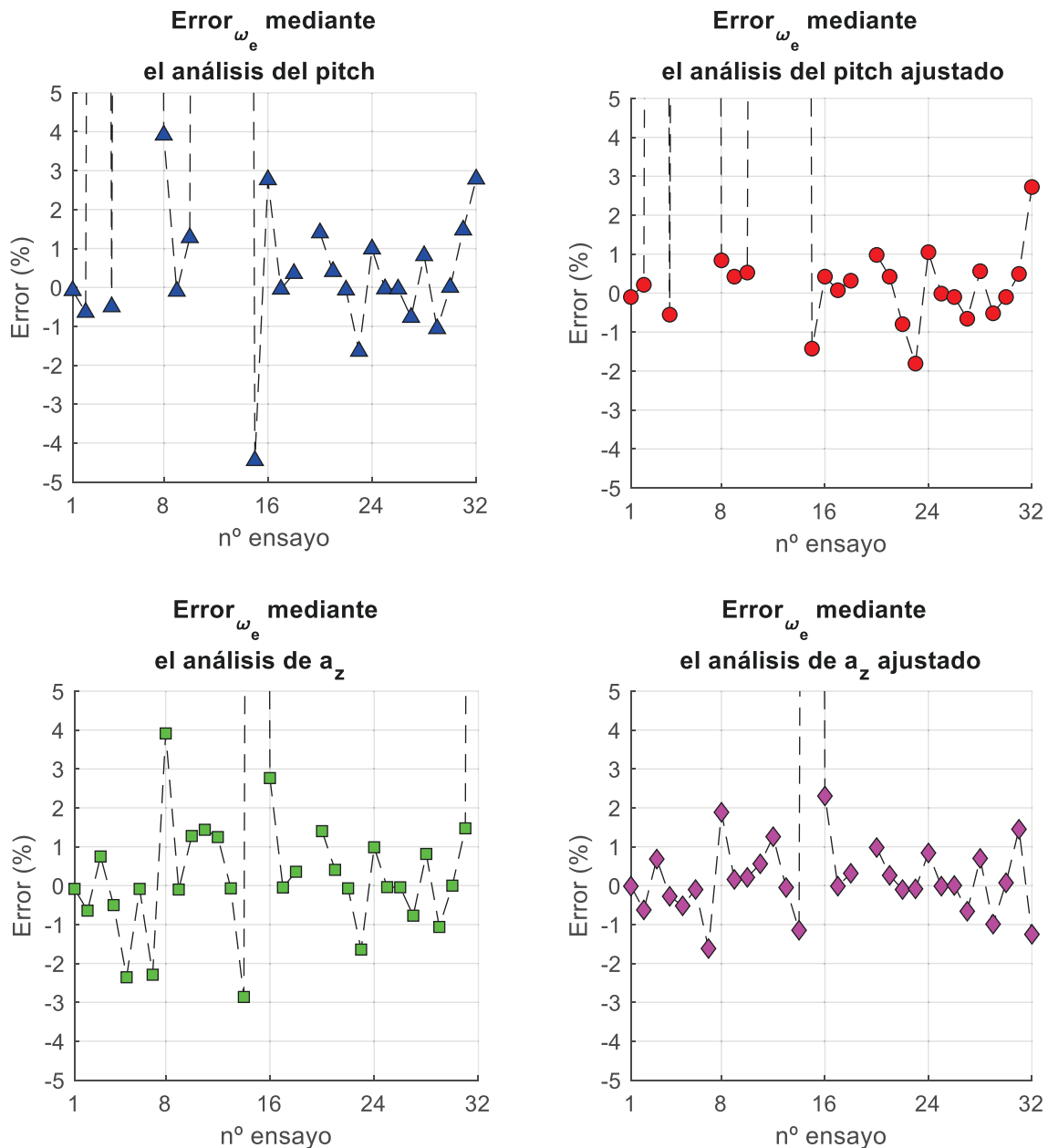


Ilustración 14 Error cometido en las estimaciones de ω_e , agrupados por método de estimación (entre -5 y 5%)

Como puede extraerse claramente en las gráficas, parece que el método que aporta mejores resultados a la hora de estimar la frecuencia de encuentro es el del análisis del espectro ajustado de la aceleración vertical. Aunque en el capítulo 7 se analizarán los resultados en más detalle, por ahora se puede destacar que esta opción es la que se propondrá como criterio para la obtención de ω_e^* en el siguiente apartado, y con la que se filtrará la señal del roll para obtener ω_0 .

6.2 Resultados de la estimación de la frecuencia natural de roll

Una vez se ha seleccionado el método para obtener un valor estimado de la frecuencia de encuentro, ω_e^* , se pasa a evaluar su uso como filtro de la frecuencia de encuentro en el espectro del roll para obtener un valor estimado de la frecuencia natural de balance, ω_0^* .

Como se ha explicado anteriormente (apartado 3.2), el programa base para la estimación de ω_0 se basa en la obtención del espectro del roll (y, por tanto, de ω_0^*) analizando segmentos temporales de la señal del roll de 180 s de duración, con un desfase temporal entre ellos de 10 s, para posteriormente aplicar una media móvil de los 13 últimos espectros. Tras ese promediado, se somete al espectro resultante a un suavizado de la señal y a un ajuste (mediante un algoritmo genético). Es entonces cuando se obtiene un nuevo valor de ω_0^* .

Este proyecto se centraría en procesar la señal de roll a partir de la cual el programa base hace los cálculos. Se busca reducir el posible pico que su espectro puede presentar en torno a la frecuencia de encuentro, ω_e , mediante un filtro que tome la señal del roll y elimine la componente de la señal asociada a ω_e^* . La Ilustración 15 muestra un ejemplo de cómo actuaría este filtro.

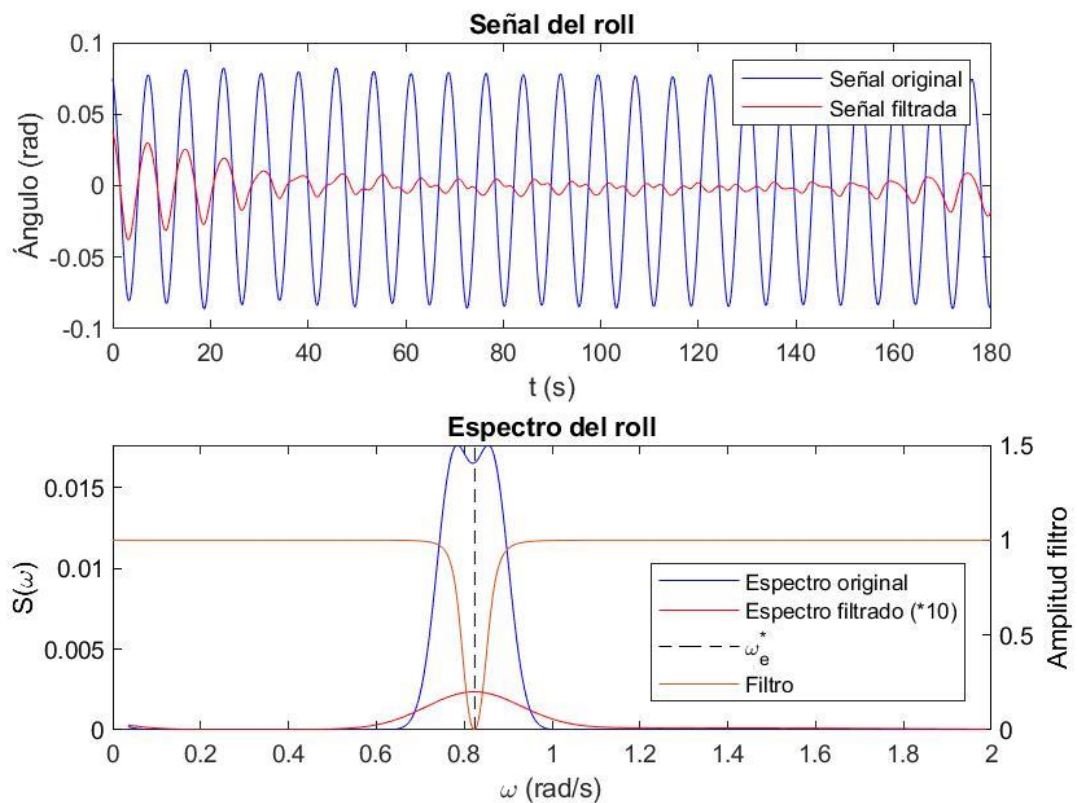


Ilustración 15 Ejemplo de filtrado del roll mediante ω_e^*

Por tanto, el proceso sería el siguiente:

1. **Obtención de las señales de roll y a_z .** Mediante la IMU instalada en el buque se obtendría una serie temporal del balance del barco y otra de la aceleración vertical. Se tomarían segmentos temporales de 180 s.
2. **Cálculo del espectro de a_z y obtención de ω_e^* .** Se realizaría este cálculo de una forma análoga a como se obtiene ω_0^* en el programa base:
 - a. **Aplicación de la FFT** a la señal de la aceleración vertical, obteniéndose así un espectro de potencia (ecuaciones (3.8) y (3.9)).
 - b. **Promediado del espectro**, mediante una media móvil que tome en cuenta el espectro del segmento temporal actual y el de los 12 segmentos anteriores (desfasados entre sí 10 s). Como se explicará unas páginas más adelante, para ciertos ensayos demasiado cortos no llega a aplicarse esto al completo.

- c. **Suavizado de la señal**, usando para ello la función *smooth* de Matlab (ecuación (3.10)).
 - d. **Ajuste de la señal**. Esta operación podría hacerse mediante un ajuste gaussiano (como se hizo durante la evaluación de los distintos métodos de obtención de ω_e^*) o mediante el algoritmo genético empleado en la estimación de ω_0 , tal y como hace el programa base. Para este estudio, se ha optado por emplear el ajuste gaussiano que se ha aplicado en la primera parte del estudio.
 - e. **Cálculo de ω_e^*** como la frecuencia en la que se produce el máximo del espectro.
3. **Filtrado de la componente de ω_e^* del segmento del roll**. Se emplearán filtros Butterworth y se distinguirán tres posibles escenarios, en función de la relación entre ω_e^* y los valores máximo y mínimo que se considera que puede llegar a tomar la frecuencia natural, $\omega_{0,min}$ y $\omega_{0,max}$.

El valor de $\omega_{0,min}$ se toma como el valor de la frecuencia natural cuando el buque estudiado tiene el *GM* mínimo necesario para que el buque tenga una escora por debajo de 15° en presencia de vientos de costado de unos 30 nudos; por otro lado, se toma $\omega_{0,max}$ como la frecuencia natural del buque cuando el *GM* corresponde con el máximo recogido en su libro de estabilidad, más un 15% de margen. Según estas consideraciones, $\omega_{0,min} = 0.3 \text{ rad/s}$ y $\omega_{0,max} = 0.925 \text{ rad/s}$ (Santiago Caamaño et al., 2019).

Teniendo esto en cuenta, existen tres posibles escenarios (ver Ilustración 16):

- a. $\omega_e^* < \omega_{0,min}$. En este caso, se filtrará la señal del roll con un filtro Butterworth de high pass de orden 3, con frecuencia de corte $\omega_{0,min}$. De esta forma, se dejarán pasar las frecuencias por encima de la frecuencia de corte, mientras que las que estén por debajo de esta se verán multiplicadas por un factor menor a 1, que las reducirá en mayor medida cuanto más se alejen de la frecuencia de corte. Respecto al orden, hace referencia a la pendiente de la curva en la zona de transición, de modo que, a mayor orden, mayor es la pendiente. Se buscará un valor lo más alto posible sin que ello suponga que el filtro se dispare y aumente la ganancia de algunas componentes del espectro.
- b. $\omega_{0,max} < \omega_e^*$. En este caso, se empleará un filtro de Butterworth de low pass y orden 3, con frecuencia de corte $\omega_{0,max}$. El funcionamiento en este caso es análogo al primero: se dejarán pasar las frecuencias por debajo de la de corte, mientras que las frecuencias más altas se verán reducidas a medida que siguen aumentando. El orden del filtro funciona igual que en el filtro high pass.
- c. $\omega_{0,min} \leq \omega_e^* \leq \omega_{0,max}$. Finalmente, ante esta situación se aplicará un filtro Butterworth stop band de orden 2. Este tipo de filtros emplea dos frecuencias de corte, de modo que reduce las componentes de las frecuencias que se encuentren entre dichos límites y deja pasar lo que esté fuera. En este caso se busca que el rango de frecuencias filtradas esté en torno a ω_e^* , y se ha considerado que la anchura de esa franja sea de un 20% de ω_e^* . Por tanto, las frecuencias de corte serán:

$$a = \omega_e^* \times \left(1 - \frac{10}{100}\right) = 0.9 \omega_e^* \quad (6.2)$$

$$b = \omega_e^* \times \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 1.1 \omega_e^* \quad (6.3)$$

4. **Cálculo del espectro del roll filtrado y procesado de este para obtener ω_0^*** . Esta parte será la que realice el programa base, tal y como ya se ha explicado anteriormente (apartado 3.2).

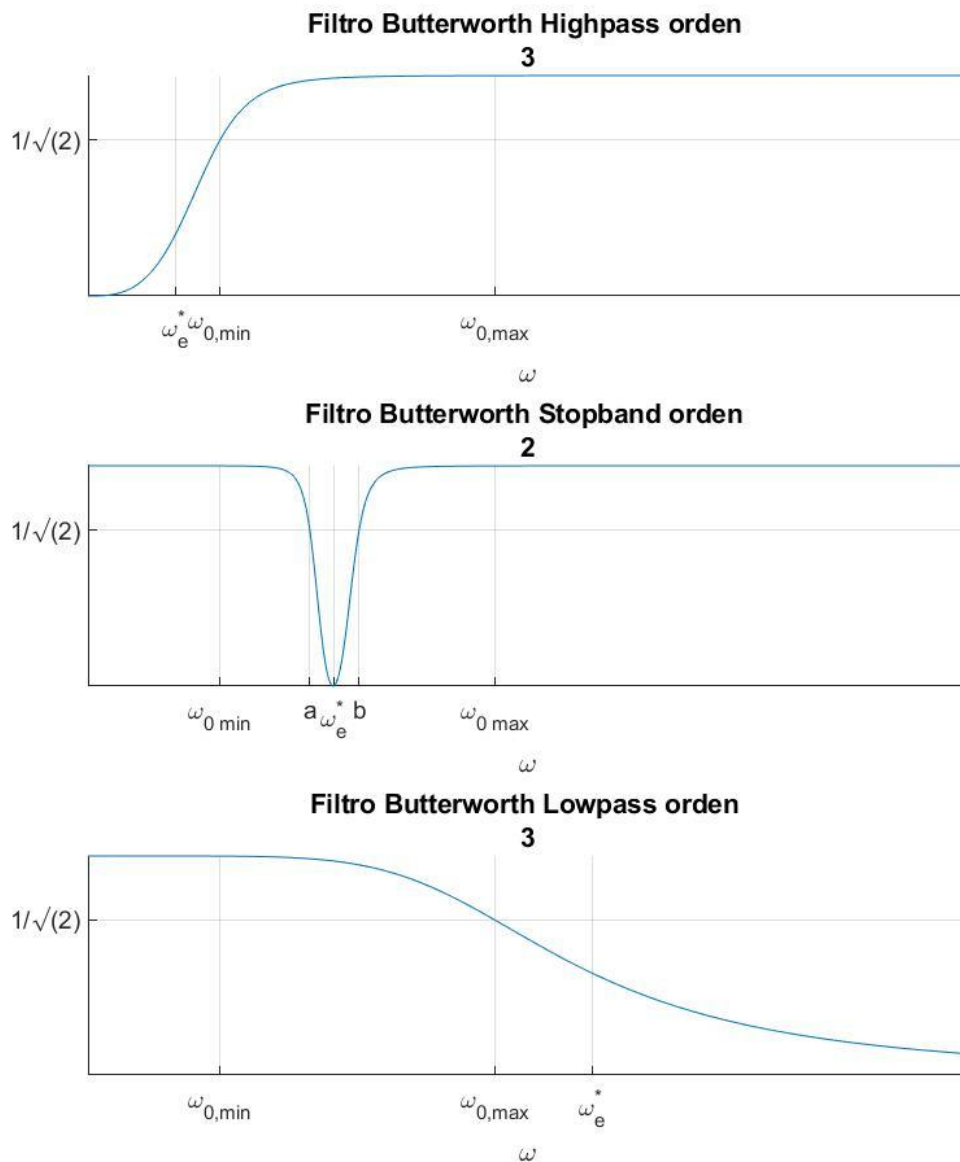


Ilustración 16 Filtros aplicados para la estimación de ω_0

Una vez explicado esto, es necesario hacer las siguientes consideraciones en lo que se refiere a cómo se han realizado los cálculos en este estudio:

- En primer lugar, se ha descrito que el cálculo de ω_e^* es un proceso continuo, que se realiza para cada segmento temporal de la misma forma que se hace para ω_0^* . No obstante, considerando que en los ensayos realizados se trabaja con olas regulares (que por tanto tienen una frecuencia de encuentro constante en todo el ensayo) y que los resultados de las estimaciones mediante el análisis del espectro de a_z parecen dar buenos resultados, en este estudio se ha optado por realizar para cada ensayo una única estimación de ω_e , obtenida a partir del análisis de todo el espectro de a_z , en vez de realizar los sucesivos cálculos de la misma forma que se hace para la frecuencia natural del roll.
- Además, se debe considerar que las series de datos obtenidas en los ensayos pueden tener una duración muy corta tras recortarlos para eliminar la parte transitoria de la señal. Esto se traduce en que habrá bastantes ensayos en los

que el número de segmentos temporales con los que trabajar se verá limitado, llegando en algunos casos aislados a no alcanzar los 180 s fijados como el mínimo para cada muestra.

En el Anexo 2 se incluyen las gráficas obtenidas para cada ensayo, mostrando los distintos resultados obtenidos en cada segmento de tiempo tanto aplicando el filtro a la señal del roll como sin aplicarlo (esto es, los resultados que generaría el programa base). Así mismo, también se incluye la evolución del error en la estimación de ω_0 con cada segmento temporal, tanto aplicando el filtro como sin él.

A modo de resumen, se aportan los siguientes elementos:

- En primer lugar, en la Tabla 10 y en la Tabla 11 se recogen los resultados numéricos de cada ensayo, agrupándolos por olas de igual altura y dirección. Para cada ensayo se presenta:

- El filtro que ha entrado en acción a la hora de calcular los valores de ω_0^* .
- La mediana de los n valores de ω_0^* obtenidos, tanto aplicando el filtro como sin él.

$$\widetilde{\omega}_0^* = M_e(\omega_{0,i}^*), i = 1, 2, \dots, n \quad (6.4)$$

- La mediana de los errores (en tanto por ciento respecto al valor real) de las n estimaciones realizadas, tanto aplicando el filtro como sin él.

$$\widetilde{\epsilon}_{\omega_0^*} = M_e(\epsilon_{\omega_{0,i}^*}), i = 1, 2, \dots, n \quad (6.5)$$

- La Ilustración 17 muestra la evolución de ω_0^* con el tiempo para cada ensayo. Se han agrupado los ensayos según la altura y dirección de ola, y se han ajustado los ejes para que las cuatro gráficas estén a la misma escala.
- La Ilustración 18 muestra la evolución del error en la estimación de ω_0 con el paso del tiempo, expresado en tanto por ciento respecto al valor real. Para tener una mayor resolución de las gráficas, se ha optado por representar únicamente los errores comprendidos entre el -10 y el 10%, ya que la mayoría de las estimaciones que se salen de ese rango de error se mueven en un orden del 50%.

Tabla 10 Resultados de la estimación de ω_0 : olas de costado (ensayos 1-16)

E	ω_e^* (rad/s)	Ciclos	Filtro	Filtro		No filtro	
				$\tilde{\omega}_0^*$ (rad/s)	$\tilde{\epsilon}_{\omega_0^*}$	$\tilde{\omega}_0^*$ (rad/s)	$\tilde{\epsilon}_{\omega_0^*}$
Ensayos 1-8 ($H = 1.8\text{ m}$; $\alpha = 90^\circ$; $\omega_0 = 0.560\text{ rad/s}$)							
1	1.147	1	Lowpass	1,148	105,05%	1,087	94,19%
2	0.950	2	Lowpass	0,929	65,88%	0,990	76,84%
3	0.825	10	Stopband	0,930	66,05%	0,852	52,19%
4	0.715	7	Stopband	0,709	26,58%	0,719	28,33%
5	0.634	2	Stopband	0,683	22,02%	0,616	10,00%
6	0.573	1	Stopband	0,523	-6,67%	0,631	12,77%
7	0.513	2	Stopband	0,504	-10,00%	0,551	-1,66%
8	0.487	1	Stopband	0,487	-12,98%	0,476	-15,08%
Ensayos 9-16 ($H = 3.0\text{ m}$; $\alpha = 90^\circ$; $\omega_0 = 0.560\text{ rad/s}$)							
9	1.149	1	Lowpass	0,527	-5,86%	1,146	104,67%
10	0.958	7	Lowpass	0,912	62,90%	0,914	63,25%
11	0.824	4	Stopband	0,930	66,05%	0,802	43,25%
12	0.726	1	Stopband	0,713	27,30%	0,723	29,05%
13	0.637	2	Stopband	0,651	16,23%	0,631	12,63%
14	0.567	1	Stopband	0,615	9,82%	0,613	9,47%
15	1.046	1	Lowpass	0,513	-8,41%	0,567	1,17%
16	0.489	1	Stopband	0,510	-8,95%	0,435	-22,41%

Tabla 11 Resultados de la estimación de ω_0 : olas de proa (ensayos 17-32)

E	ω_e^* (rad/s)	Ciclos	Filtro	Filtro		No filtro	
				$\widetilde{\omega}_0^*$ (rad/s)	$\widetilde{\epsilon}_{\omega_0^*}$	$\widetilde{\omega}_0^*$ (rad/s)	$\widetilde{\epsilon}_{\omega_0^*}$
Ensayos 17-24 ($H = 1.8\text{ m}$; $\alpha = 180^\circ$; $\omega_0 = 0.560\text{ rad/s}$)							
17	1.147	12	Lowpass	0.587	6.04%	0.581	4.87%
18	0.959	9	Lowpass	0.538	3.87%	0.551	3.65%
20	0.724	5	Stopband	0.571	1.91%	0.573	2.33%
21	0.639	6	Stopband	0.538	3.97%	0.597	6.52%
22	0.573	2	Stopband	0.491	12.37%	0.541	3.42%
23	0.521	3	Stopband	0.579	3.42%	0.600	7.22%
24	0.482	3	Stopband	0.571	1.96%	0.575	2.66%
Ensayos 25-32 ($H = 3.0\text{ m}$; $\alpha = 180^\circ$; $\omega_0 = 0.560\text{ rad/s}$)							
25	1.147	19	Lowpass	0,570	1,84%	0,607	8,33%
26	0.956	15	Lowpass	0,546	-2,54%	0,545	-2,72%
27	0.814	13	Stopband	0,574	2,55%	0,573	2,37%
28	0.722	8	Stopband	0,578	3,25%	0,582	3,95%
29	0.631	4	Stopband	0,567	1,23%	0,616	10,09%
30	0.574	2	Stopband	0,582	3,86%	0,606	8,16%
31	0.529	4	Stopband	0,590	5,35%	0,586	4,56%
32	0.472	2	Stopband	0,584	4,30%	0,549	-1,93%

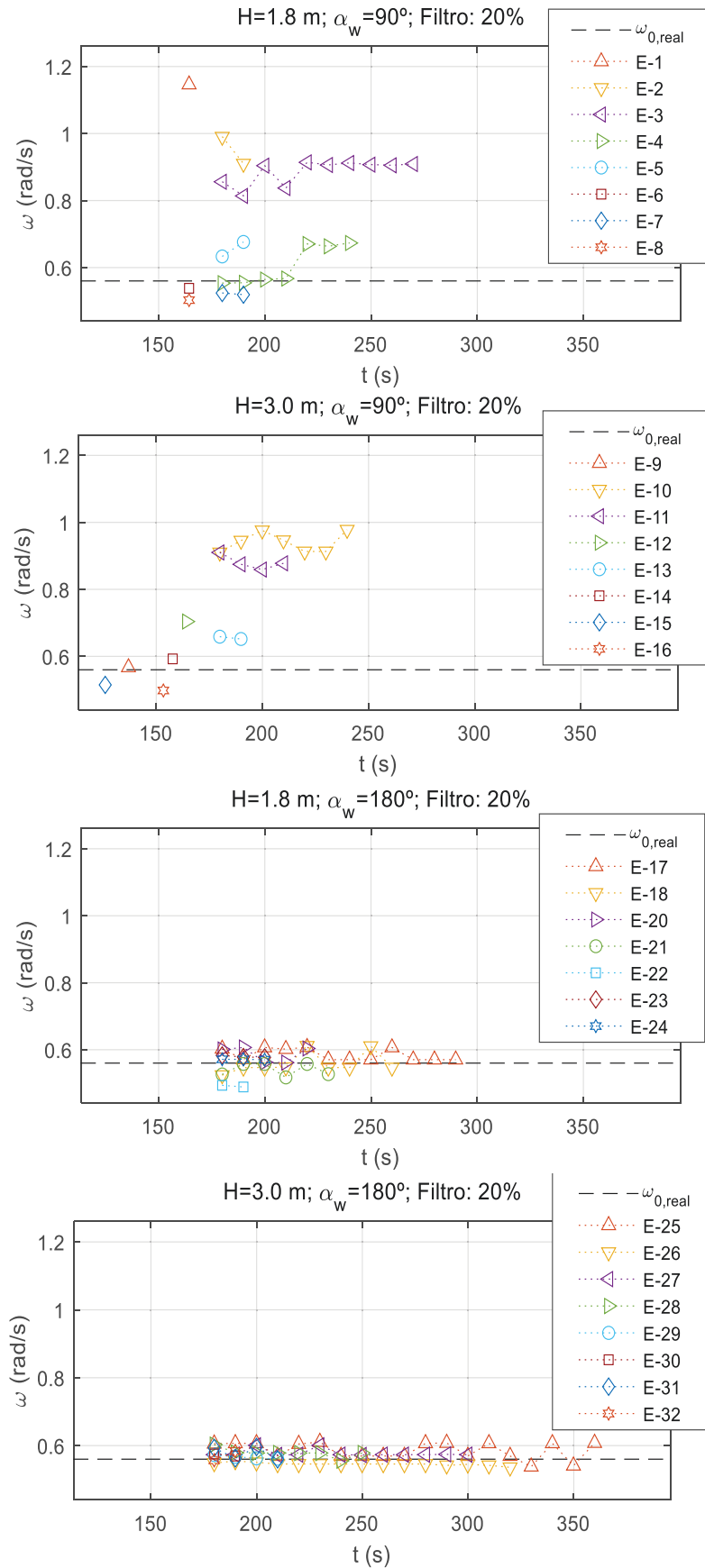


Ilustración 17 Evolución de ω_0^* con el tiempo

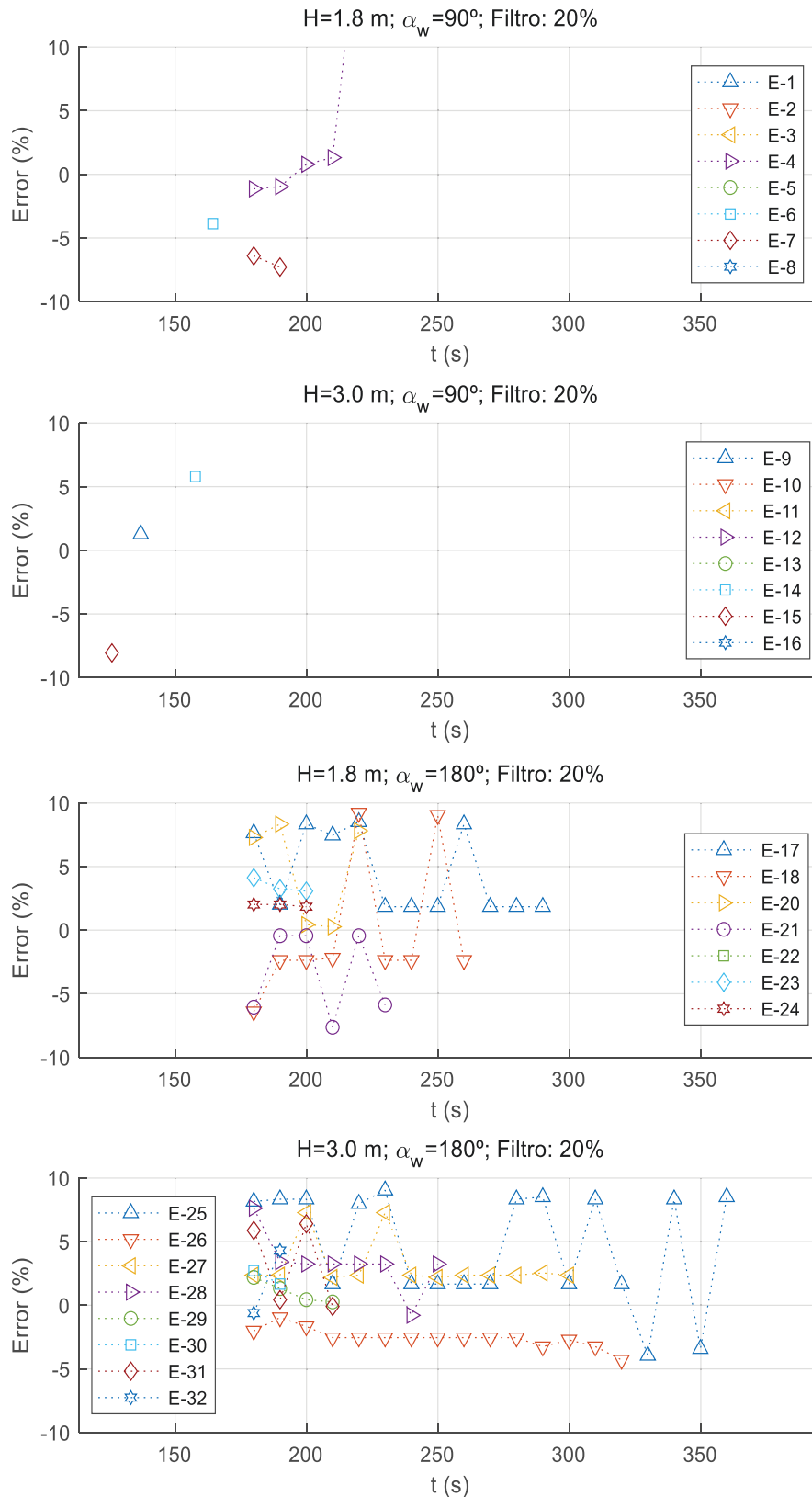


Ilustración 18 Evolución del error en la estimación de ω_0 con el tiempo (entre -10 y 10%)

7 DISCUSIÓN

7.1 Discusión de los resultados de la estimación de ω_e

A través de los resultados obtenidos en el análisis de la estimación de la frecuencia de encuentro (ver páginas 24-27, desde la Tabla 6 hasta la Ilustración 14) se puede realizar una comparativa entre los distintos métodos de estimación. Las principales observaciones que se realizan son las siguientes:

1. **En general se obtienen mejores resultados para los ensayos con olas de proa que para aquellos con olas de costado.** Esto tiene sentido, ya que con olas de proa es esperable que el movimiento del pitch tenga una mayor amplitud, al mismo tiempo que se generan mayores movimientos en el eje vertical, lo que se traduce en mayores oscilaciones de a_z . Por tanto, los espectros de ambas señales serán más marcados y permitirán una mejor estimación de la frecuencia de encuentro.
2. **Las estimaciones a través de a_z arrojan resultados más homogéneos.** Mientras que la estimación mediante el pitch genera valores de ω_e^* más dispersos (sobre todo en los ensayos con olas de costado, en los que la señal del pitch es más baja), a través de la aceleración se obtienen valores más homogéneos entre sí, con contadas excepciones en los que la estimación da valores muy alejados del real.
3. **La estimación mediante el espectro ajustado de a_z supone mejores resultados.** Con la excepción del ensayo 15 (en el que la estimación obtenida se aleja mucho de la realidad), el error del resto de estimaciones oscila entre el -2 y el 3%. Este es el mejor rango de error de los 4 métodos, seguido de cerca por la estimación mediante el espectro de a_z sin ajuste (rango de errores -3 y 4%, aunque presenta más casos con errores fuera del rango aceptable).
4. **El espectro ajustado de a_z puede ser empleado como criterio para estimar la frecuencia de encuentro del buque con las olas.** Aunque sería necesario realizar más estudios en un futuro para evaluar los resultados obtenidos en condiciones más próximas a la realidad (olas irregulares, modelo en movimiento, presencia de viento, mayor rango de ángulos de incidencia de las olas...), sí que parece una vía prometedora para estimar ω_e en tiempo real.

7.2 Discusión de los resultados de la estimación de ω_0

Tomando como base los resultados reflejados en el capítulo anterior (ver páginas 32-35, desde la Tabla 10 hasta la Ilustración 18), se pueden sacar conclusiones sobre la efectividad del filtrado de ω_e en la señal del roll para la estimación de ω_0 , así como de la diferencia entre las estimaciones generadas por el programa base (sin filtrado) y el programa modificado (con filtrado).

1. **La estimación de ω_0 presenta bastante dispersión.** Tanto en la estimación con el filtrado previo como sin este, se observa que las desviaciones de las distintas ω_0^* respecto a la ω_0 real no presentan un carácter homogéneo, sino que su error oscila en un amplio rango. Es destacable que en los ensayos con olas de proa los errores se reducen y las estimaciones se encuentran más próximas al valor real, al contrario que en los ensayos con olas de costado, donde el error está más repartido.
2. **El filtrado apunta a una mejora de la precisión de los resultados, pero no son óptimos.** Al analizar los datos de medianas reflejados en la Tabla 10 y en

- la Tabla 11 y aplicarles a su vez la mediana, se observa que para las estimaciones a las que se les aplicó el filtro se obtiene $M_e(\widetilde{\omega}_0^*) = 0.578 \text{ rad/s}$ y $M_e(\widetilde{\epsilon}_{\omega_0^*}) = 3.25\%$. En comparación, estos mismos parámetros para los resultados sin filtrado son $M_e(\widetilde{\omega}_0^*) = 0.603 \text{ rad/s}$ y $M_e(\widetilde{\epsilon}_{\omega_0^*}) = 7.72\%$. Esto apunta a una mejora de la precisión en las estimaciones, pero no supone una mejoría de estas. Esto se debe a que el sistema muestra una tendencia a sobreestimar la frecuencia natural del roll, que a su vez se traduce en una sobreestimación de la estabilidad, lo cual no es deseable.
3. **Es necesario estudiar en más profundidad el filtro.** Si se observa la Ilustración 16, se puede ver que el filtro lowpass tiene una pendiente muy suave, que se puede traducir en un filtrado insuficiente de ω_e^* a no ser que su valor sea mucho mayor que el máximo valor considerado de ω_0 . Por otro lado, en lo que respecta al filtro stopband, sería recomendable realizar más análisis en los que se consideren distintas combinaciones de orden del filtro y frecuencias de corte en torno a ω_e^* , y así mejorar los resultados. Para terminar, hay que destacar que en este estudio no ha llegado a entrar en acción el filtro highpass, por lo que se desconoce su comportamiento y los resultados que generaría.

8 CONCLUSIONES

La estabilidad es un factor crítico para los buques, y la experiencia demuestra las graves consecuencias que pueden tener los fallos de estabilidad y la importancia que tiene para evitar daños personales, materiales, medioambientales y económicos.

Dicho esto, la pesca marina es ampliamente considerada una de las actividades económicas más peligrosas que existen, y estudios han apuntado a que gran parte de los accidentes graves en este ámbito tienen su causa en fallos de estabilidad de los pesqueros. Son muchos los factores que llevan a esta situación, aunque una causa destacable es la falta de formación de las tripulaciones en materia de estabilidad, que suelen optar por guiarse por la experiencia propia y que asumen el riesgo como parte de su vida laboral, descuidando la seguridad en pos de aumentar las ganancias.

En las últimas décadas se han desarrollado varios sistemas de guía a bordo, con el objetivo de presentar a los marineros información básica y crucial sobre la estabilidad de forma visual y sencilla. Estos sistemas han ido evolucionando en concepción y funcionamiento, y hoy día la tendencia es la de desarrollar sistemas automáticos que puedan evaluar la estabilidad en tiempo real, a través de la estimación de la frecuencia natural del balance para así determinar la altura metacéntrica actual.

Dentro de esta última generación de sistemas se encuentra el programa abordado en este proyecto. El algoritmo de este sistema emplea la Transformada Rápida de Fourier de forma recursiva para analizar el movimiento del balance del buque, y así realizar estimaciones de la frecuencia natural cada poco tiempo. Este método ha sido probado y estudiado en numerosos estudios y presenta resultados favorables, aunque también tiene debilidades y necesita más trabajo de validación. Uno de esos puntos débiles es la interferencia de otras fuentes de excitación en el espectro del roll, como la frecuencia de encuentro de las olas, lo que puede empeorar la estimación en ciertas condiciones ambientales.

En este proyecto se ha analizado la posibilidad de evitar esta interferencia provocada por las olas. Para ello, se emplearía el mismo sistema de aplicación recursiva de la FFT en las señales del pitch y/o de la aceleración vertical, buscando así obtener el valor de la frecuencia de encuentro de las olas. Posteriormente se aplicaría un filtro sobre la señal del roll que eliminara la componente de dicha frecuencia en el espectro. Esta propuesta se ha evaluado mediante ensayos en canal de experiencias con un modelo a escala de un buque pesquero y olas regulares de costado y de proa.

Los resultados obtenidos apuntan a que el mejor método para estimar la frecuencia de encuentro de las olas es el análisis de la aceleración vertical ajustada mediante una función gaussiana, y la aplicación del filtro mediante este valor estimado parece suponer una mejora general en la precisión de la estimación de la frecuencia natural del roll. Sin embargo, la calidad de los resultados varía según las condiciones del ensayo y parece presentar una tendencia a la sobreestimación de la estabilidad. Por esto, se considera que aún queda trabajo por realizar en un futuro para mejorar este sistema.

Como futuro trabajo, se propone el estudio más exhaustivo de la estimación de la frecuencia de encuentro (mayor abanico de ángulos de encuentro, olas irregulares, buque en movimiento...), así como el estudio más detallado y la mejora del filtro de la señal del balance.

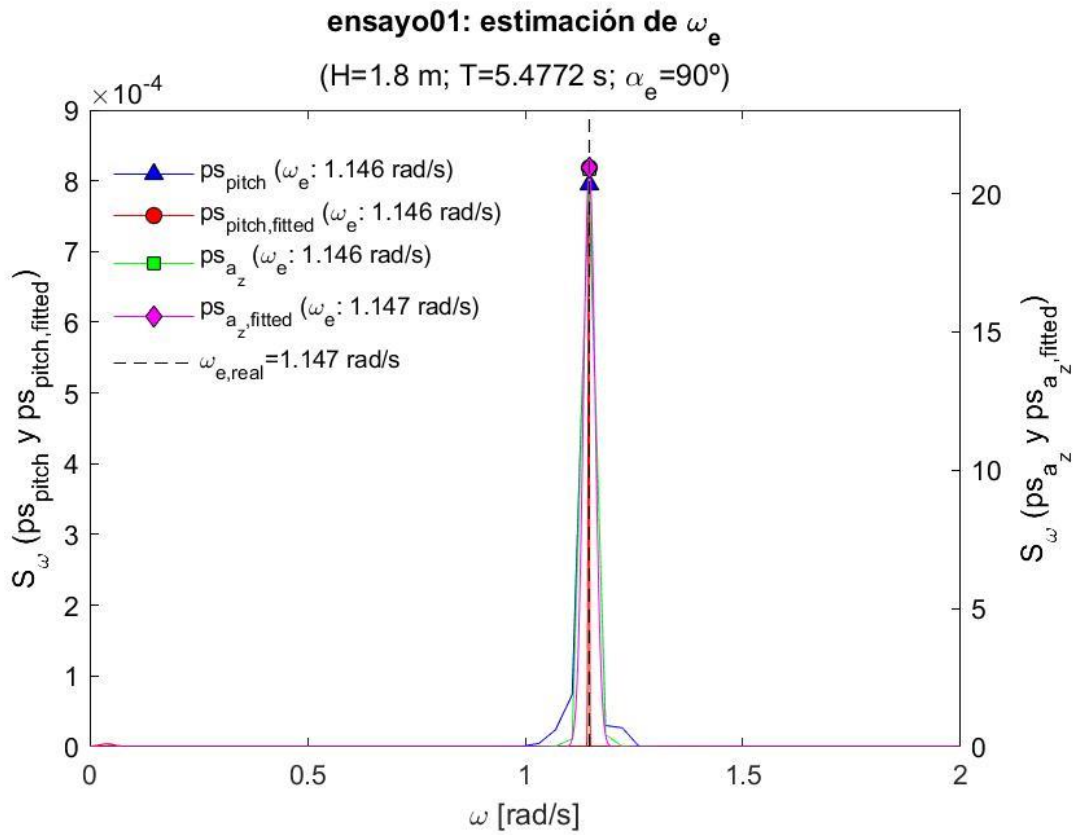
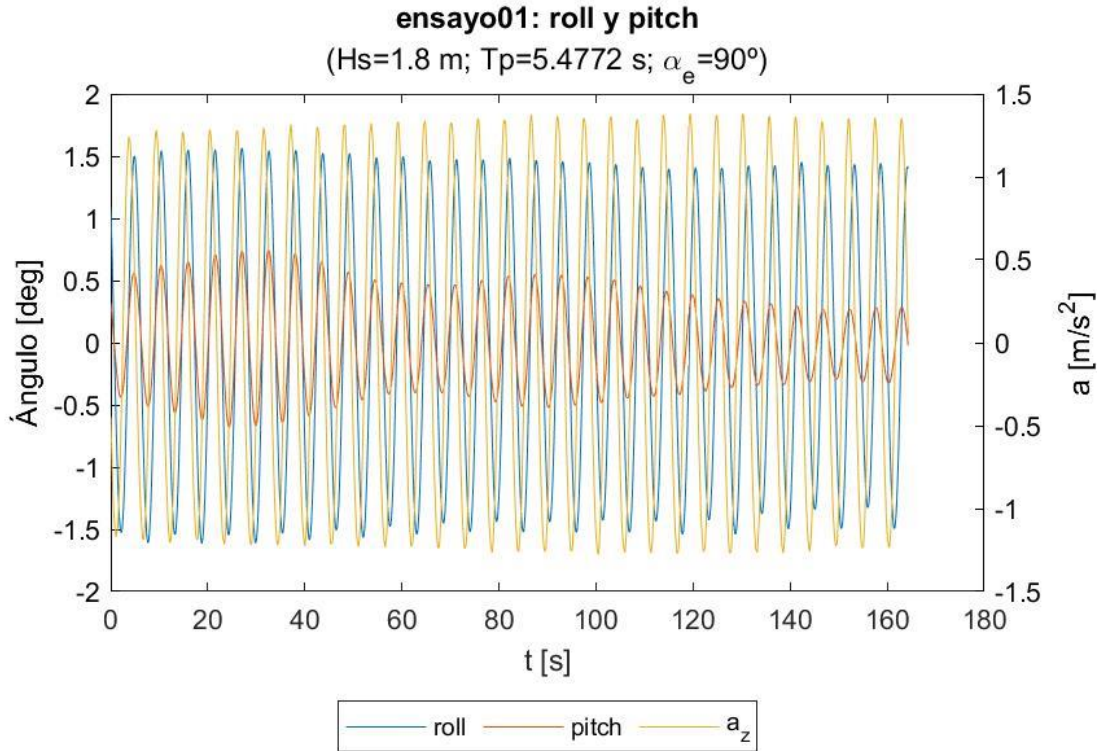
9 BIBLIOGRAFÍA

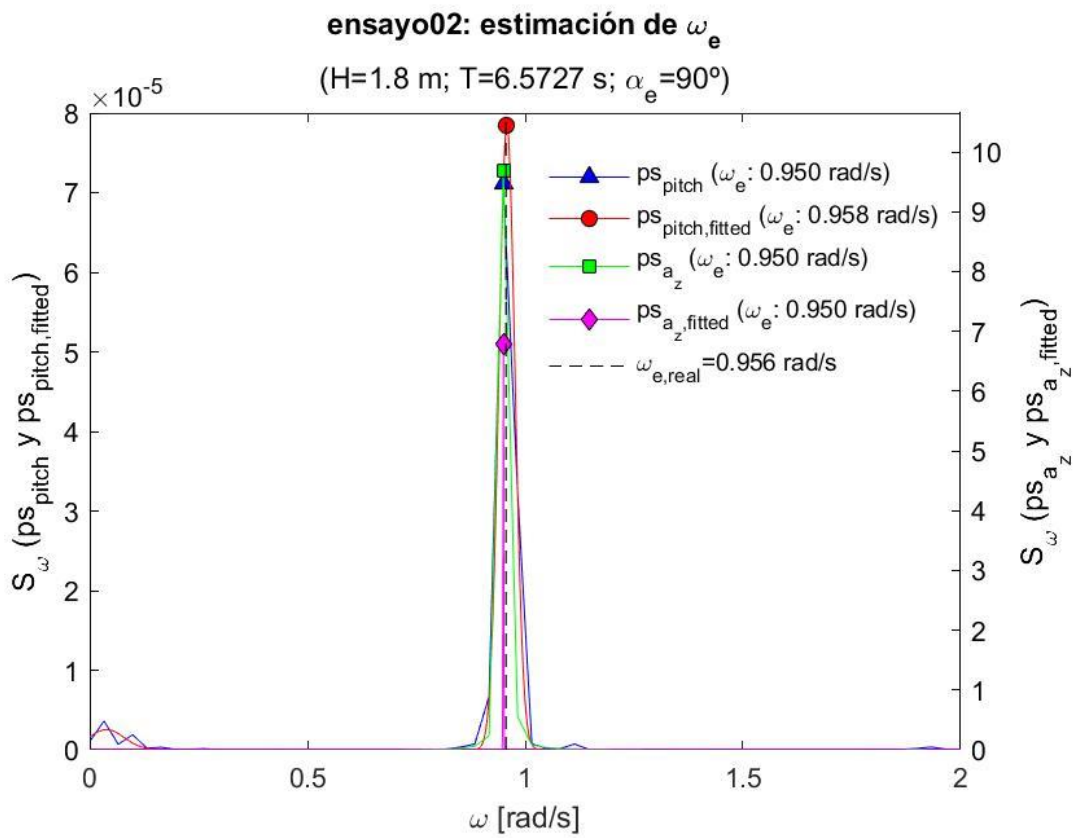
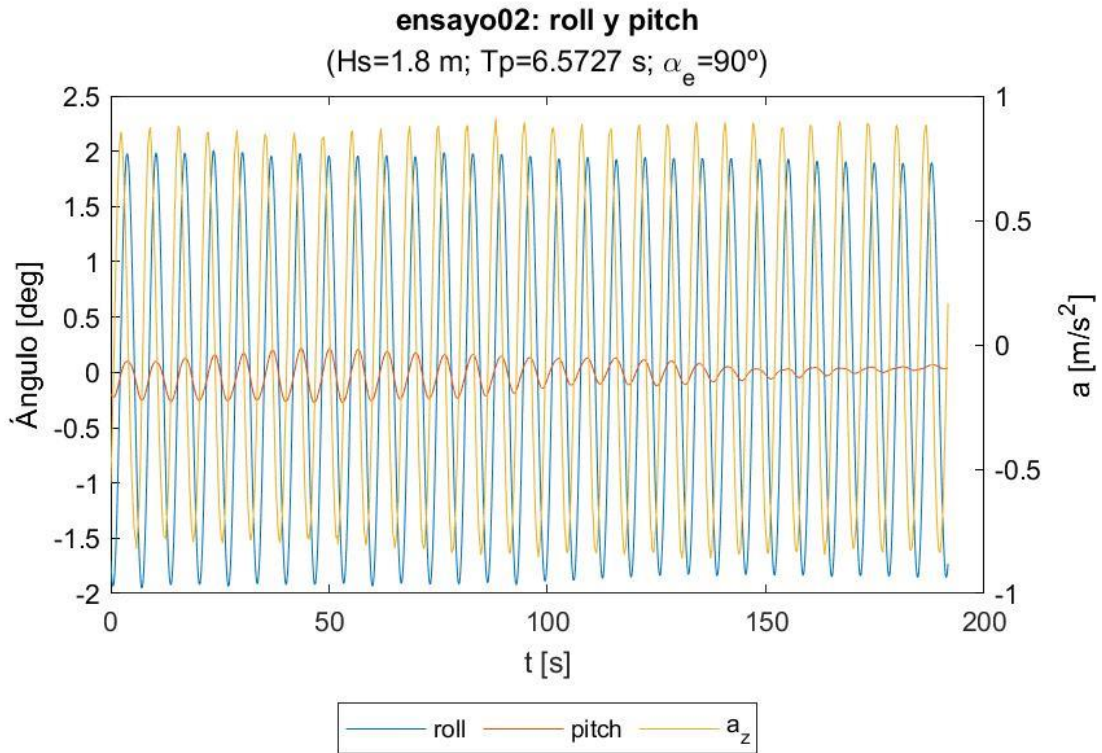
- Allegue García, S. (2020). *Validación numérica y experimental de un método para la estimación de la estabilidad del buque en tiempo real*. Universidade da Coruña.
- Lloyd, A. R. J. M. (1998). *Seakeeping: Ship behaviour in rough weather*. Lloyd, Adrian R J M.
- Míguez González, M., Bulian, G., Santiago Caamaño, L., & Díaz Casás, V. (2017). Towards real-time identification of initial stability from ship roll motion analysis. *Proceedings of the 16th International Ship Stability Workshop (ISSW 2017)*, June, 221–229. <https://bit.ly/3C1eUfV>
- Míguez González, Marcos, Caamaño Sobrino, P., Tedín Álvarez, R., Díaz Casás, V., Martínez López, A., & López Peña, F. (2012). Fishing vessel stability assessment system. *Ocean Engineering*, 41, 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.12.021>
- Moreno Reyes, F. J., & Gómez-Cano Alfaro, M. (2014). *Causas de los accidentes marítimos muy graves en la pesca 2008-2013* (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) (ed.); Vol. 148). Ministerio de Empleo y Seguridad Social. <https://bit.ly/3z4FhzE>
- Santiago Caamaño, L. (2019). *Study and development of a stability assessment system for fishing vessels to prevent capsizing during navigation*. Universidade da Coruña.
- 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. *Ocean Engineering*, 189(February), 106369. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106369>
- Santiago Caamaño, L., Míguez González, M., & Díaz Casás, V. (2018). On the feasibility of a real time stability assessment for fishing vessels. *Ocean Engineering*, 159(October 2017), 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.002>
- Secretaría General de Pesca. (2021). *La flota española. Situación a 31 de diciembre de 2020*. <https://bit.ly/2Xgiynn>
- Wikipedia. (2019). *Altura metacéntrica*. <https://bit.ly/392n8lb>

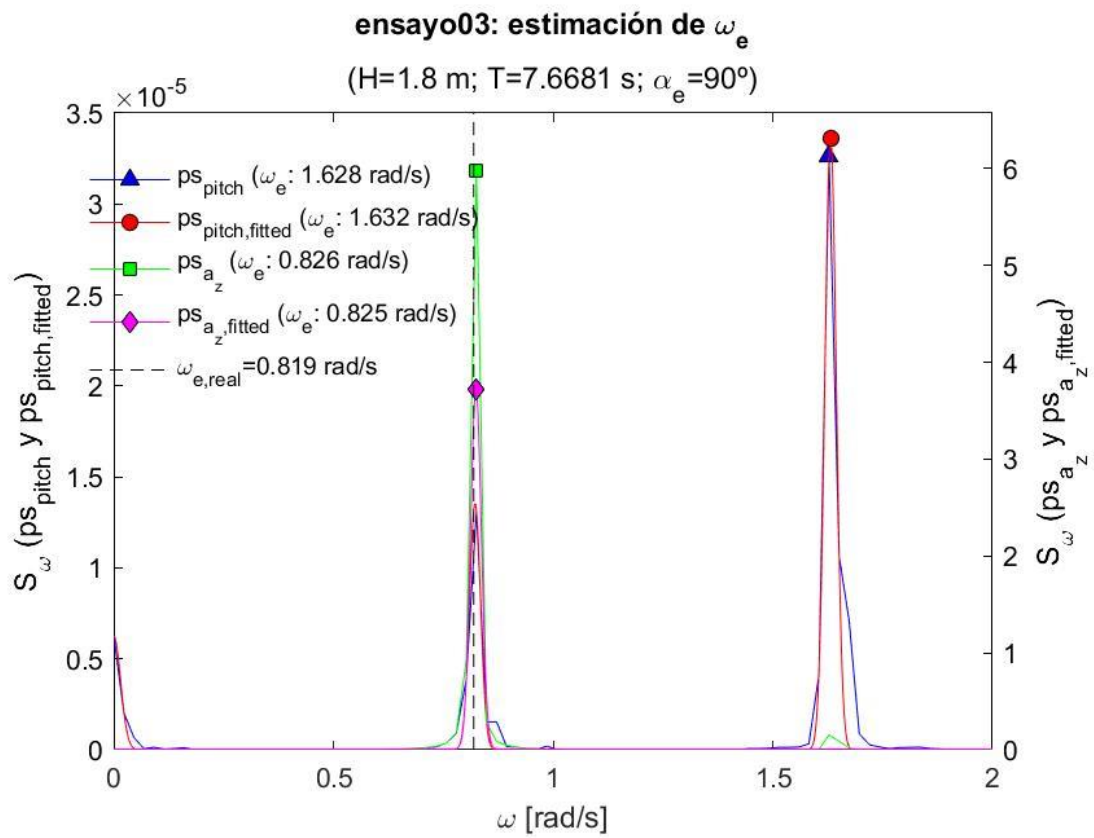
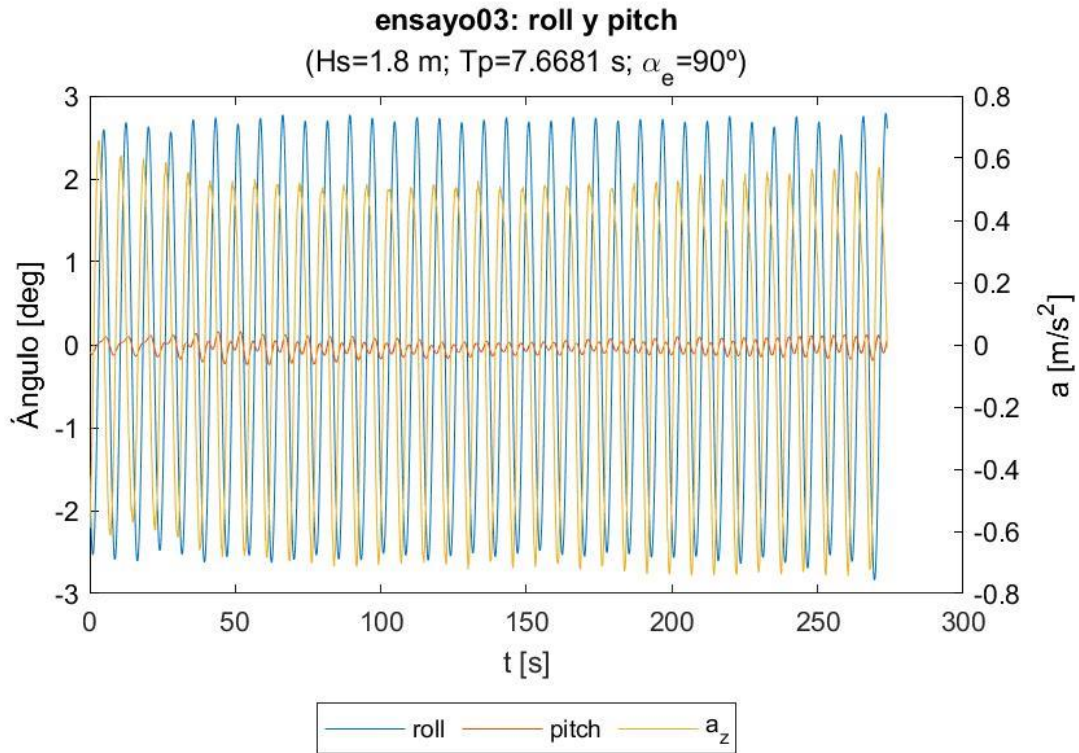
ANEXO 1. ENSAYOS Y ESTIMACIONES DE ω_e

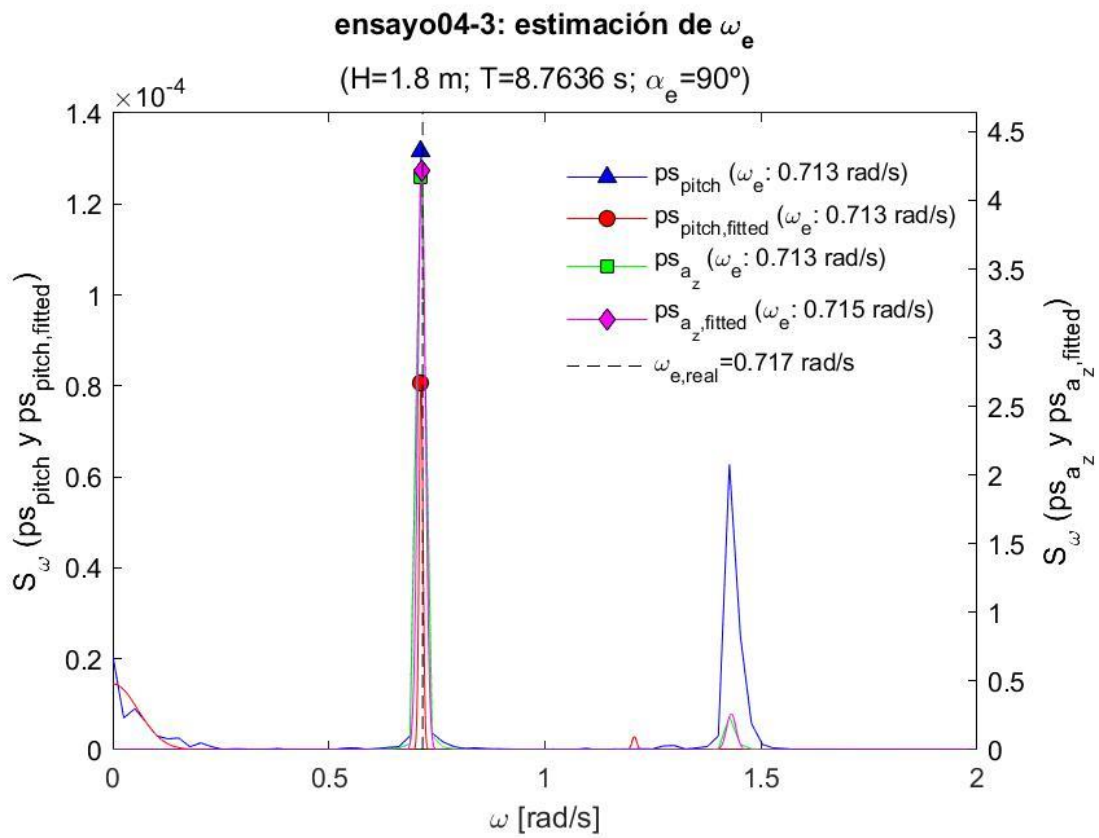
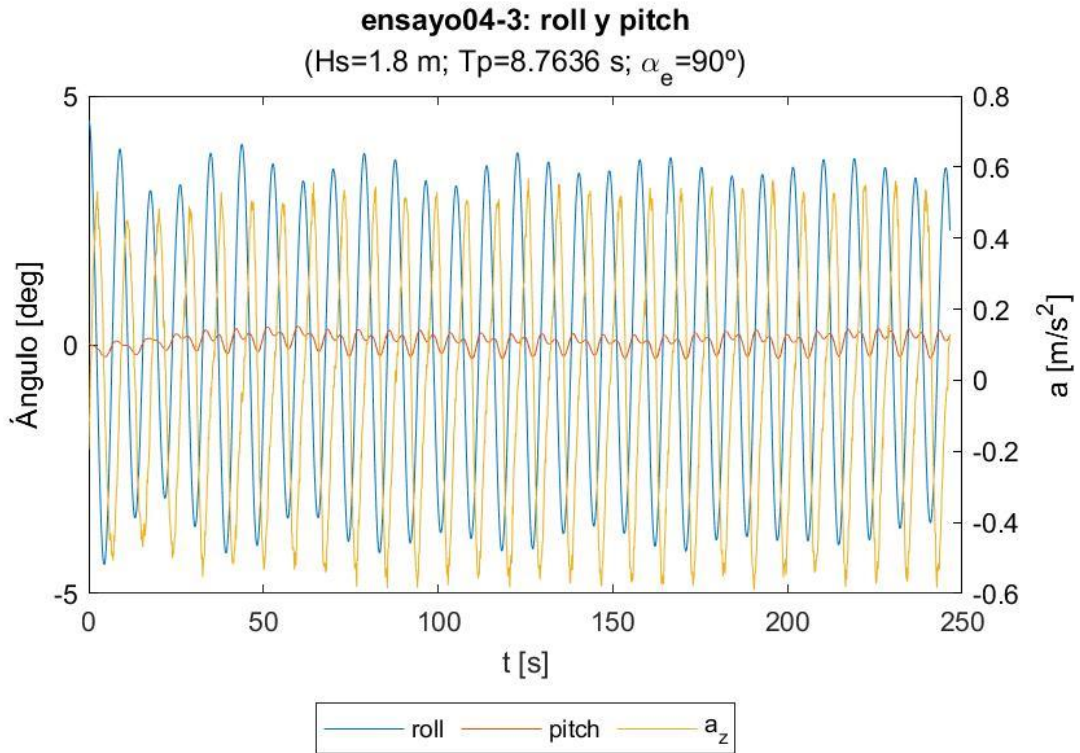
En el presente anexo se adjuntan, para cada uno de los ensayos realizados:

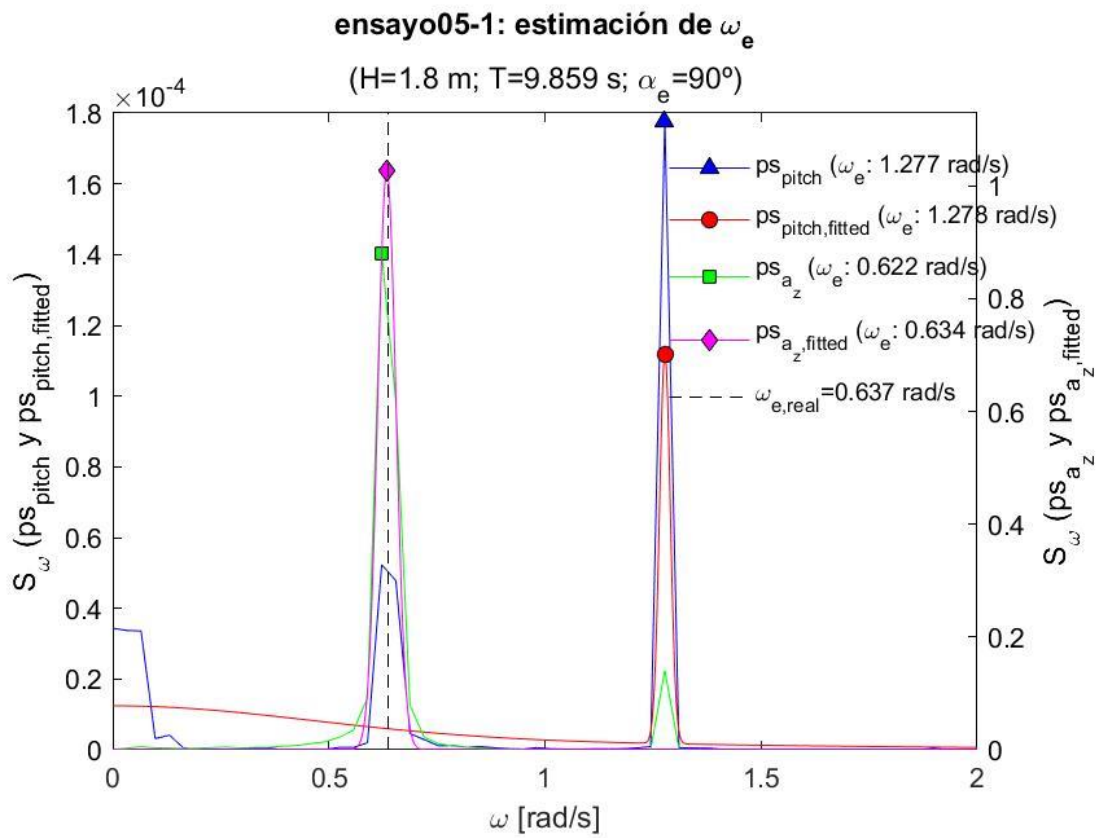
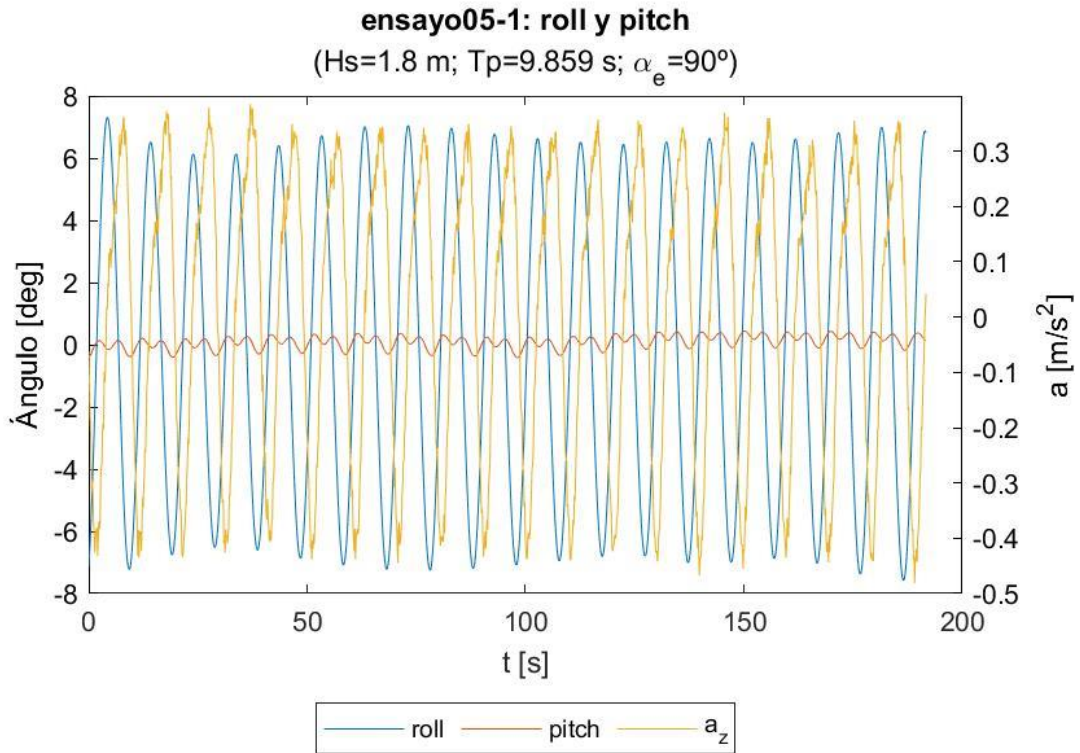
- **Los datos de roll, pitch y aceleración vertical** recogidos por la IMU del modelo. Los datos que se presentan aquí son los que se obtienen después del procesado de las señales. Por tanto, ya han sido ajustados a cero, recortados en la franja temporal de interés, redimensionados a escala real y ajustados a tiempo inicial igual a 0 s.
- **Los resultados de la estimación de ω_e .** Se presentan los espectros de potencia obtenidos de aplicar la FFT tanto al pitch como a a_z . A su vez también se presenta el espectro obtenido de cada señal tras aplicar el ajuste gaussiano. El punto destacado de cada espectro marca el punto máximo, que se emplea para obtener el valor estimado de ω_e por cada método. Finalmente, también se representa la ω_e real de cada ensayo, para dar una idea del error cometido en cada estimación.

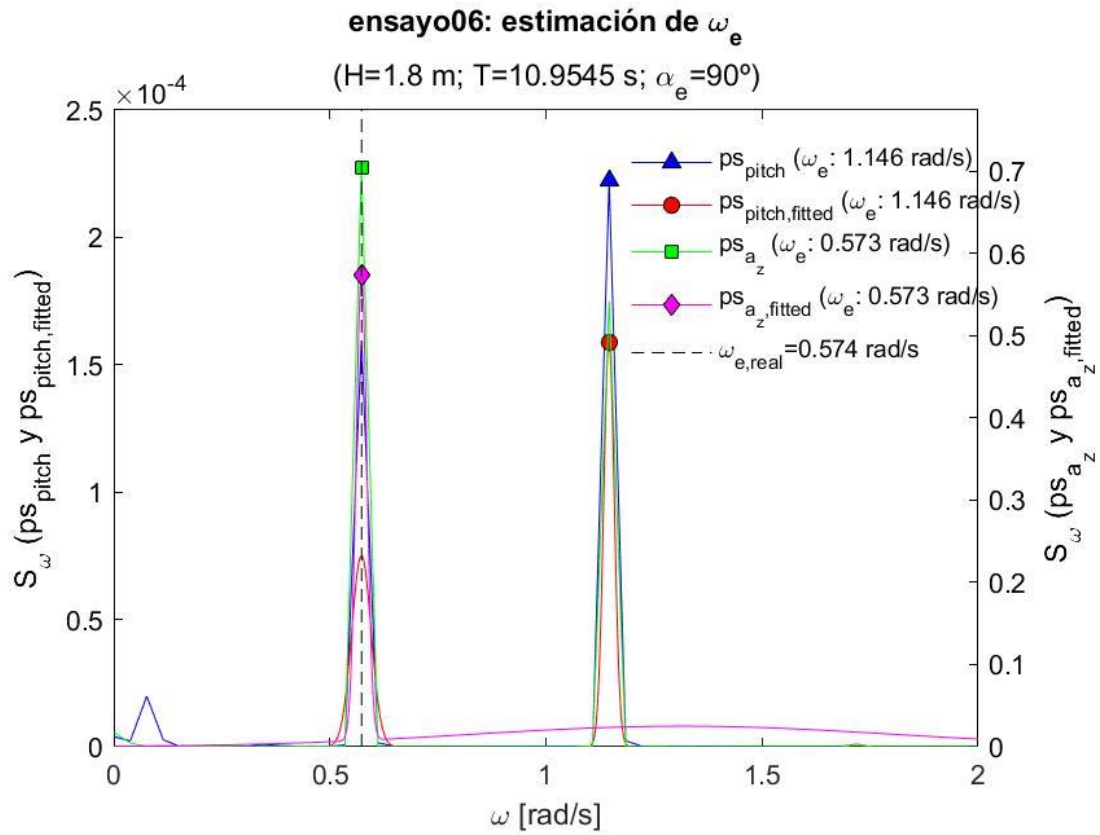
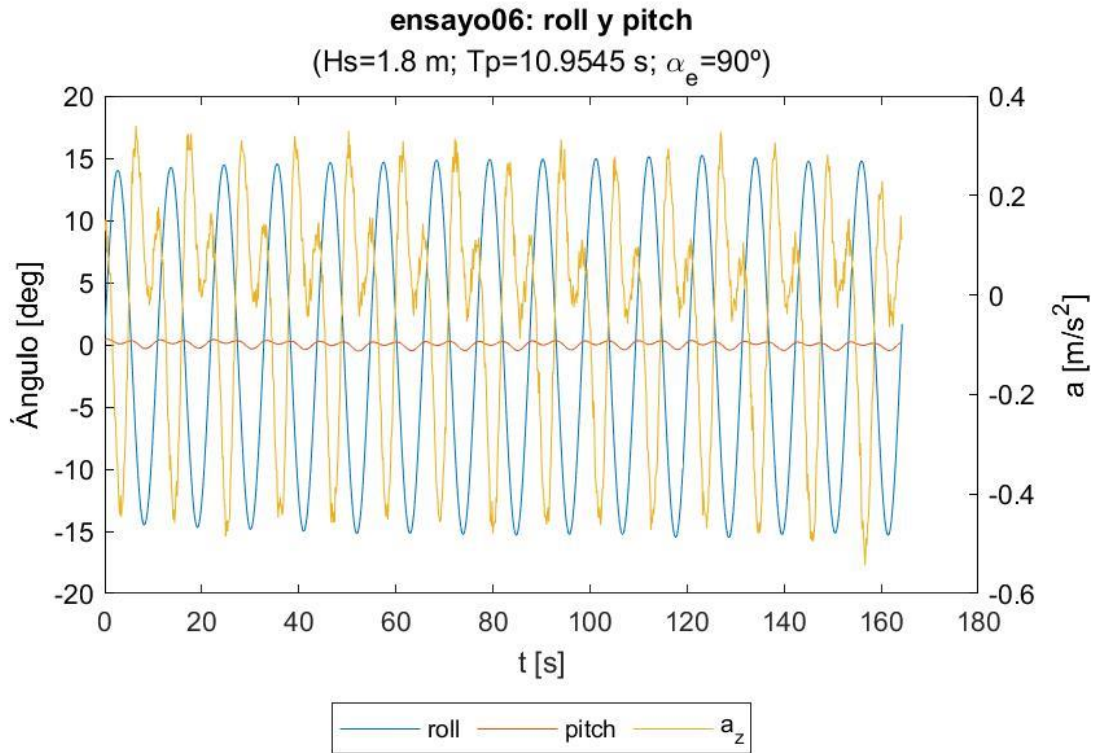


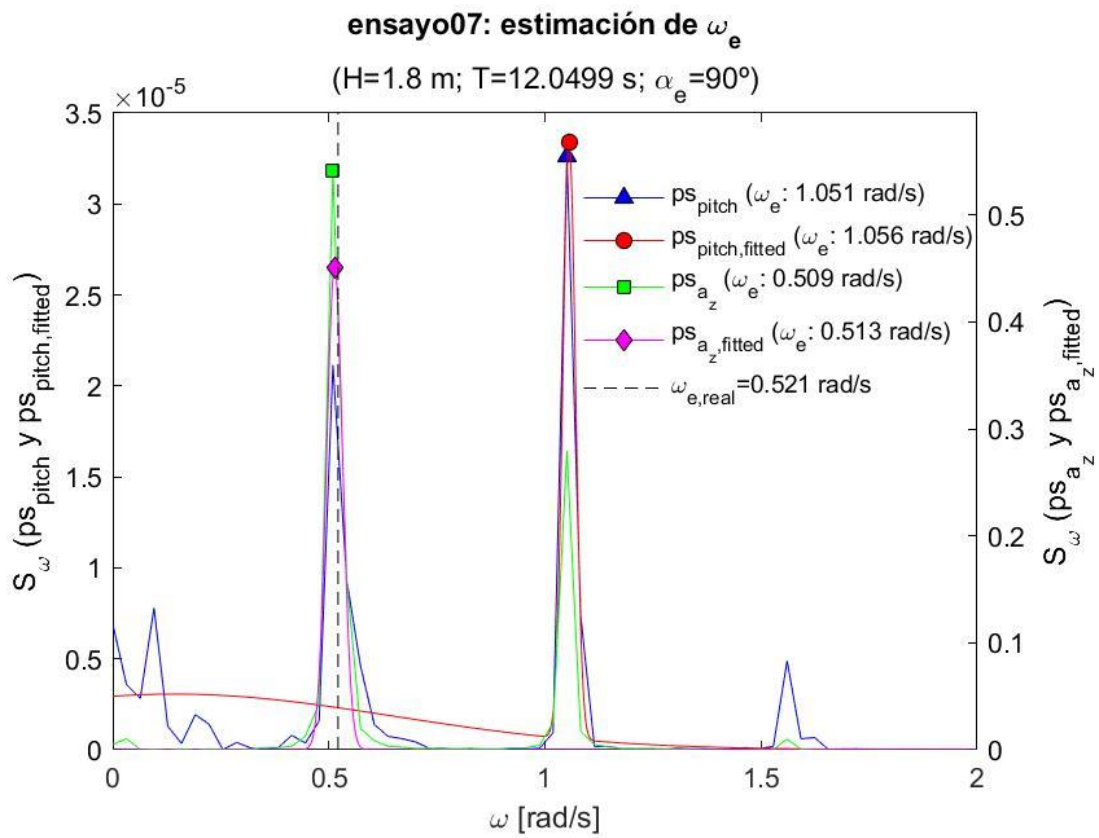
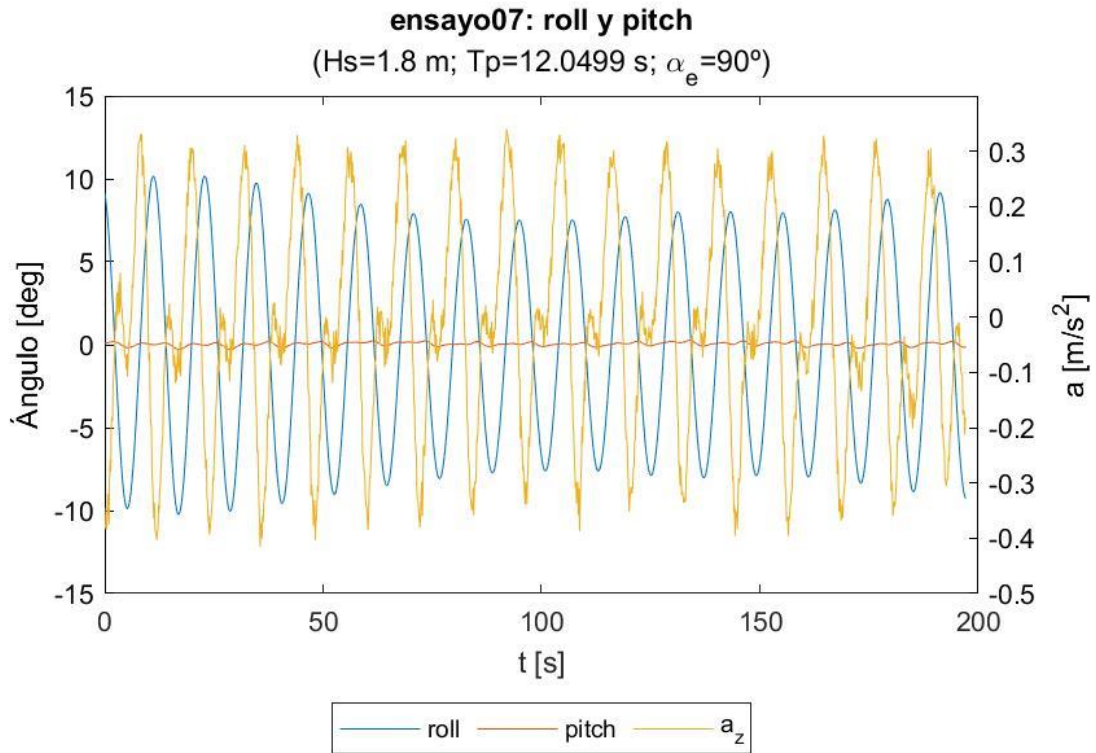


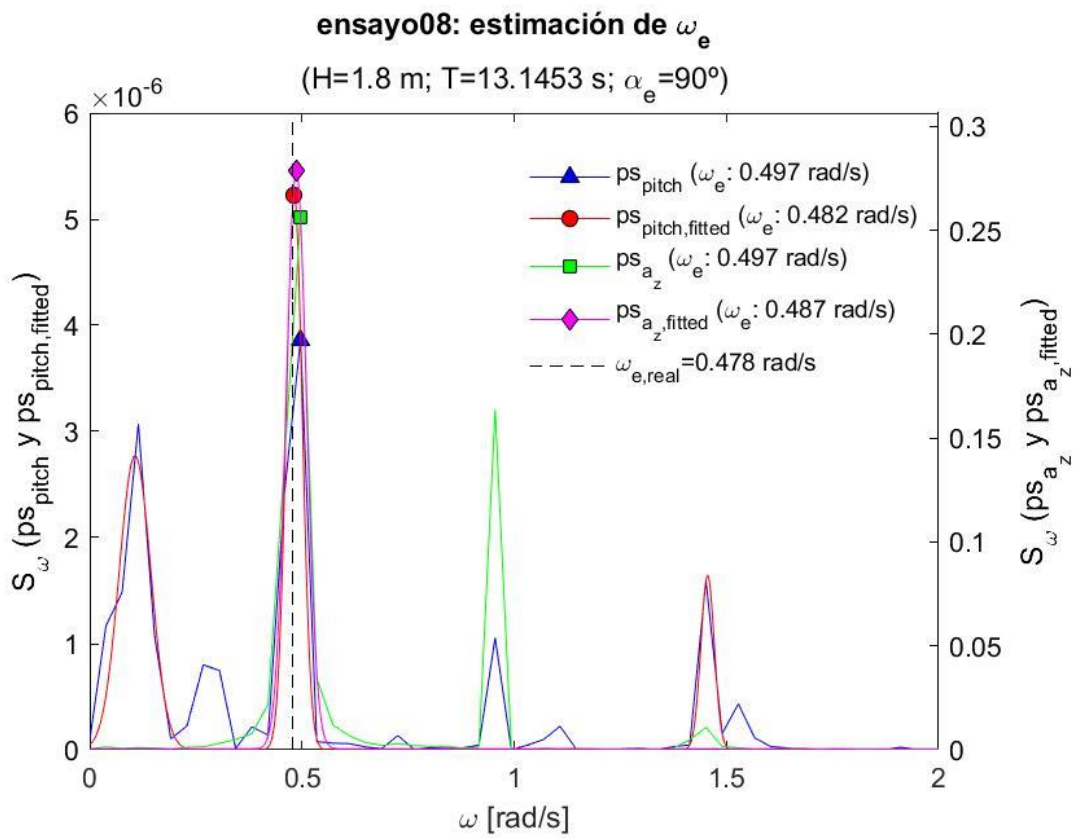
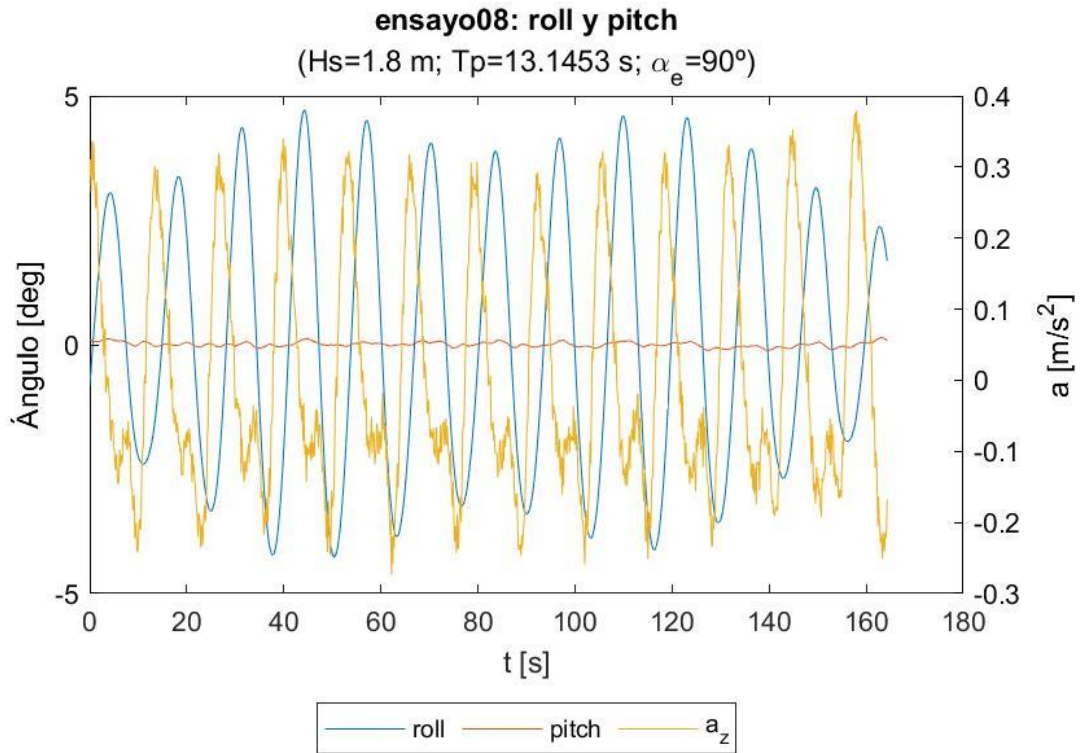


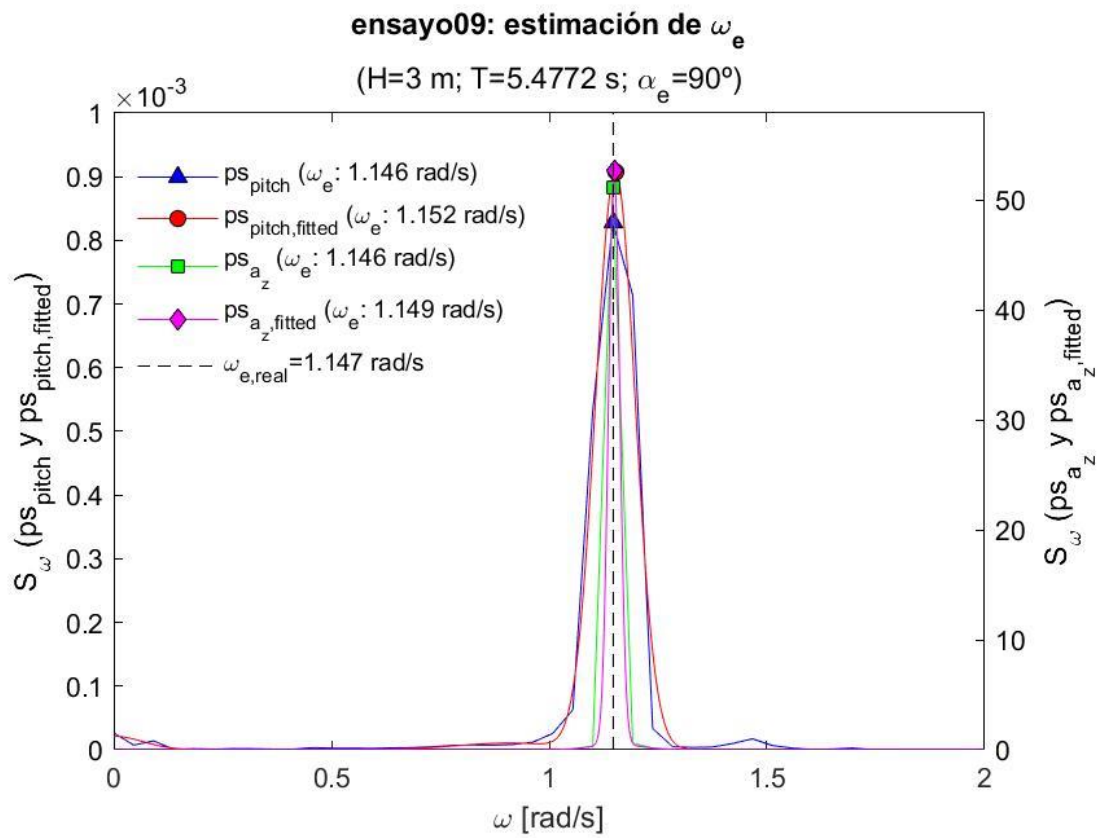
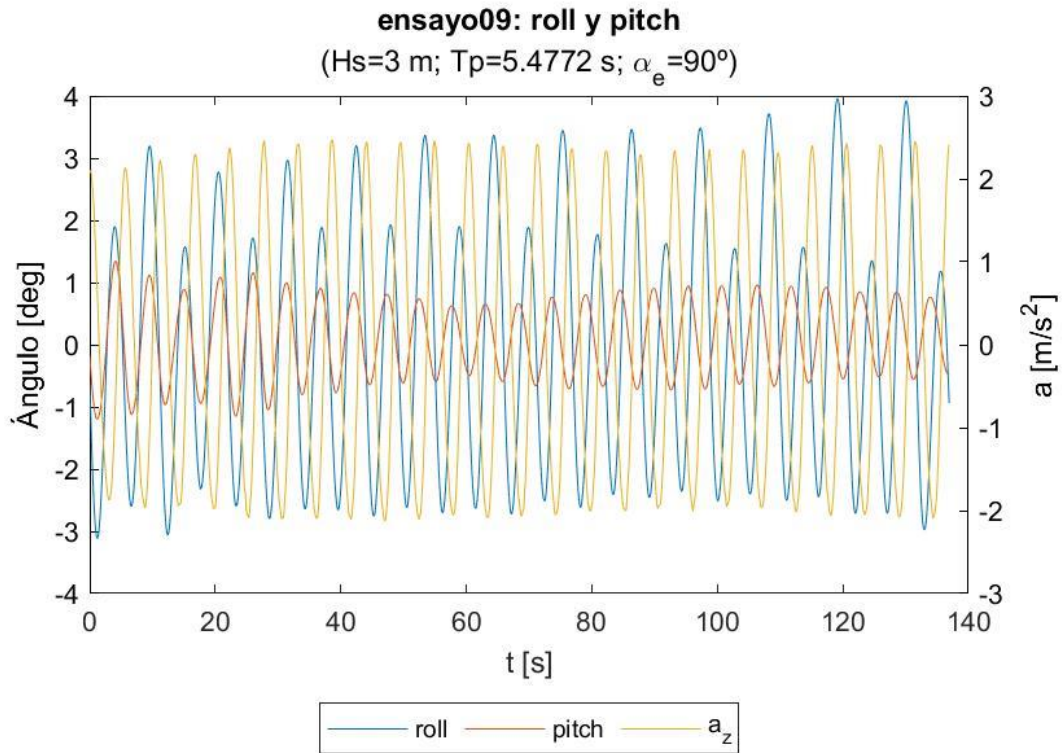


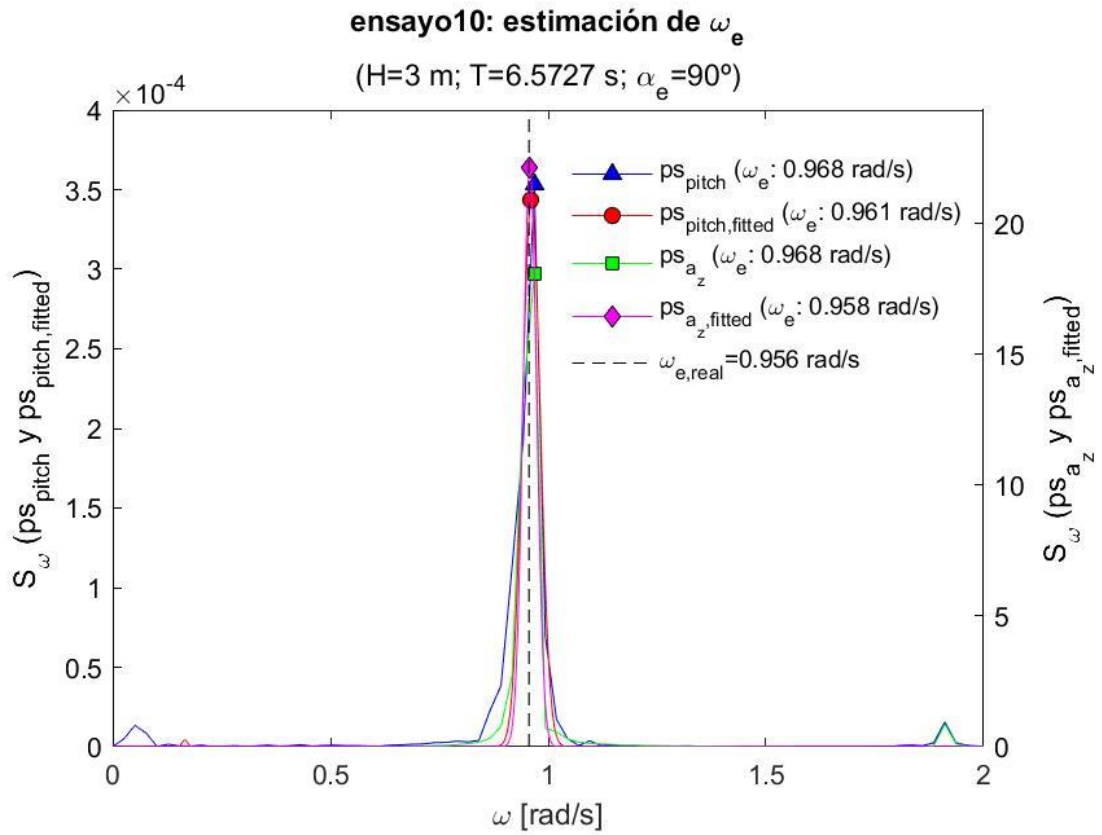
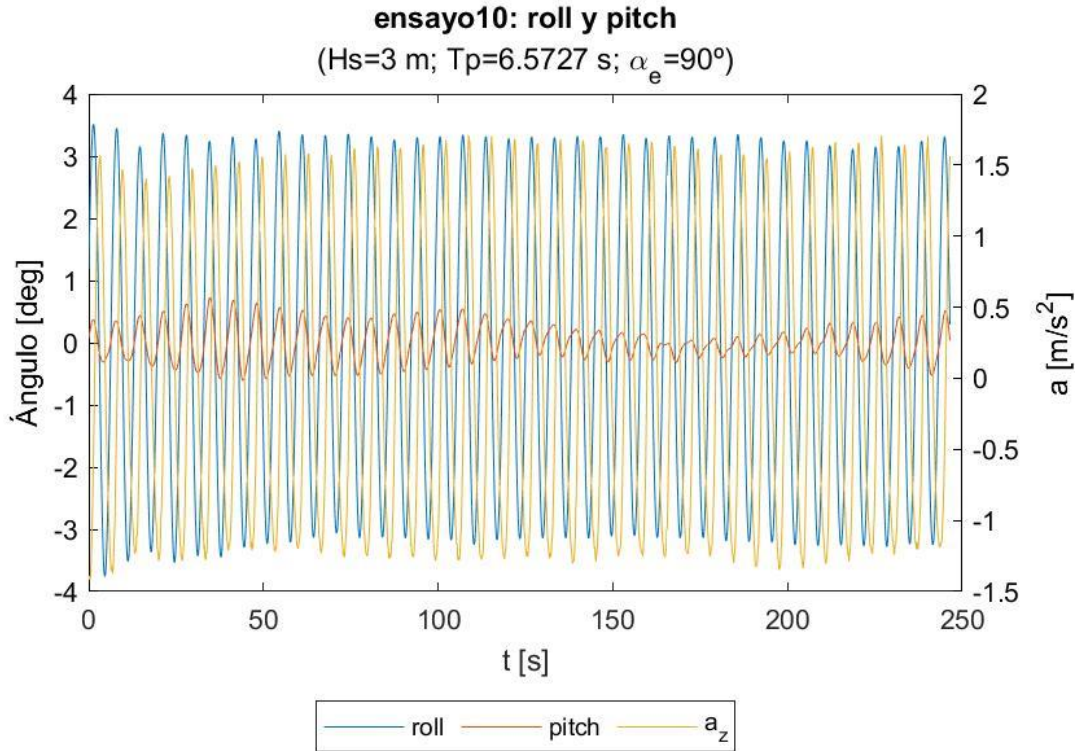


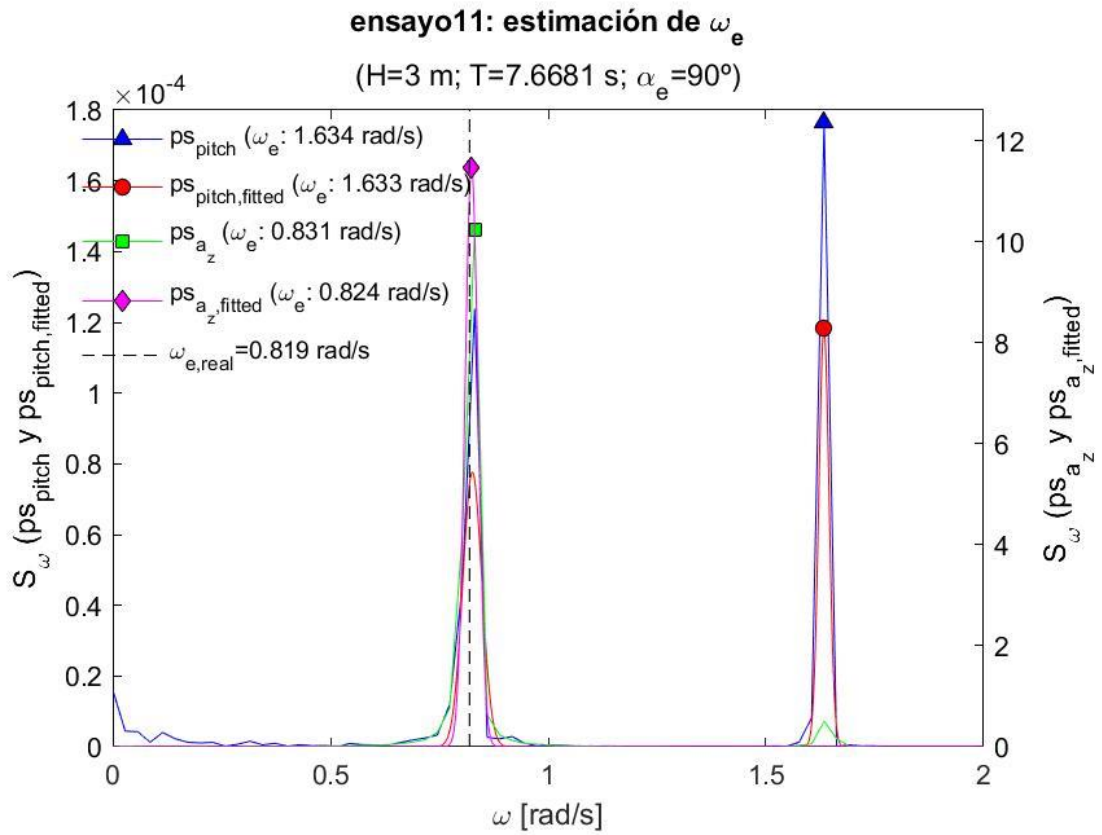
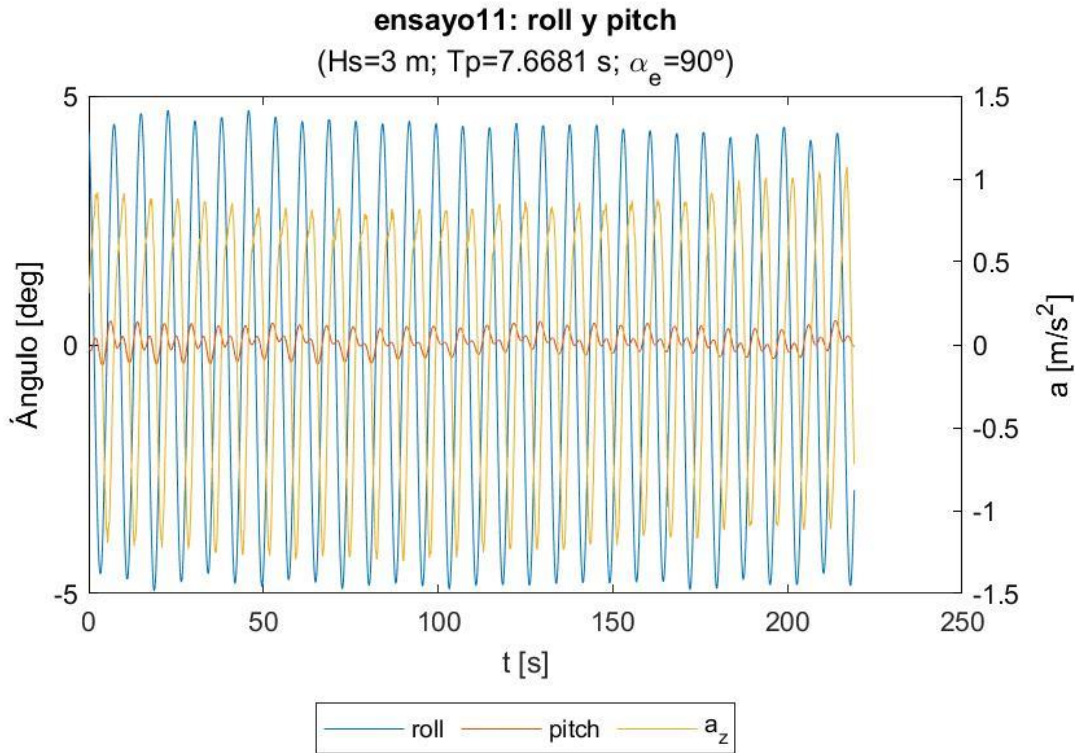


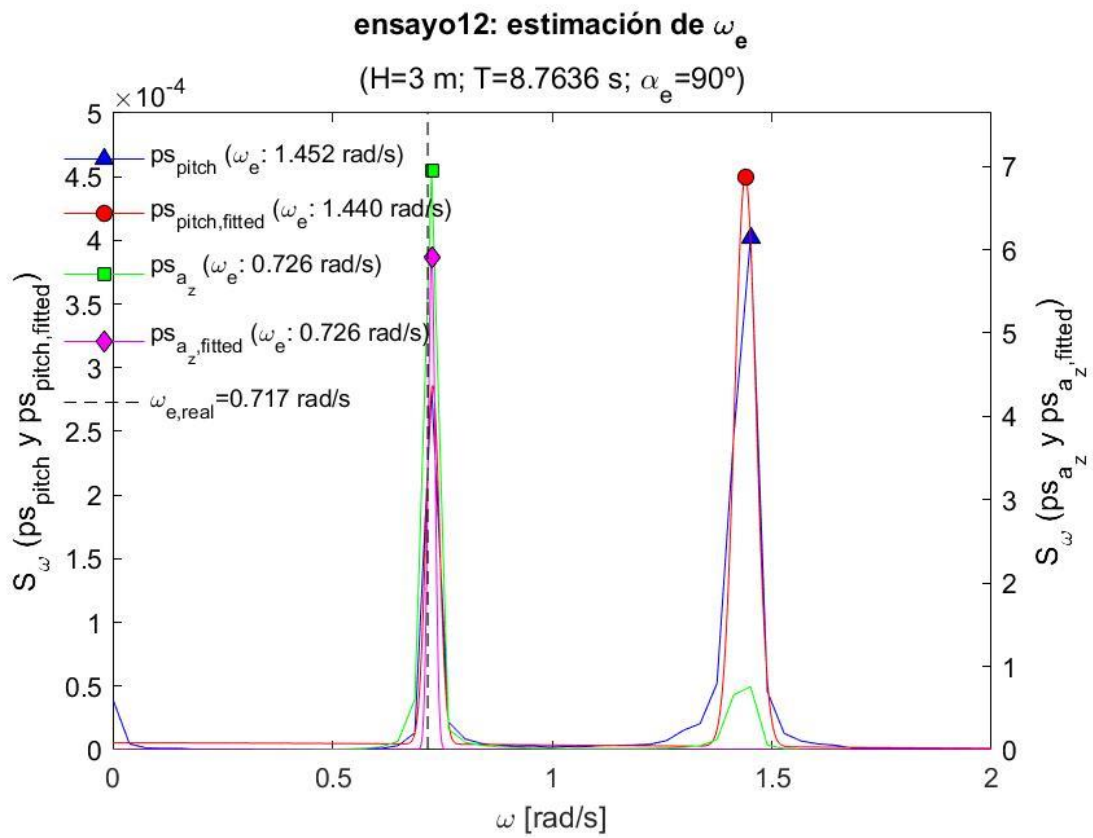
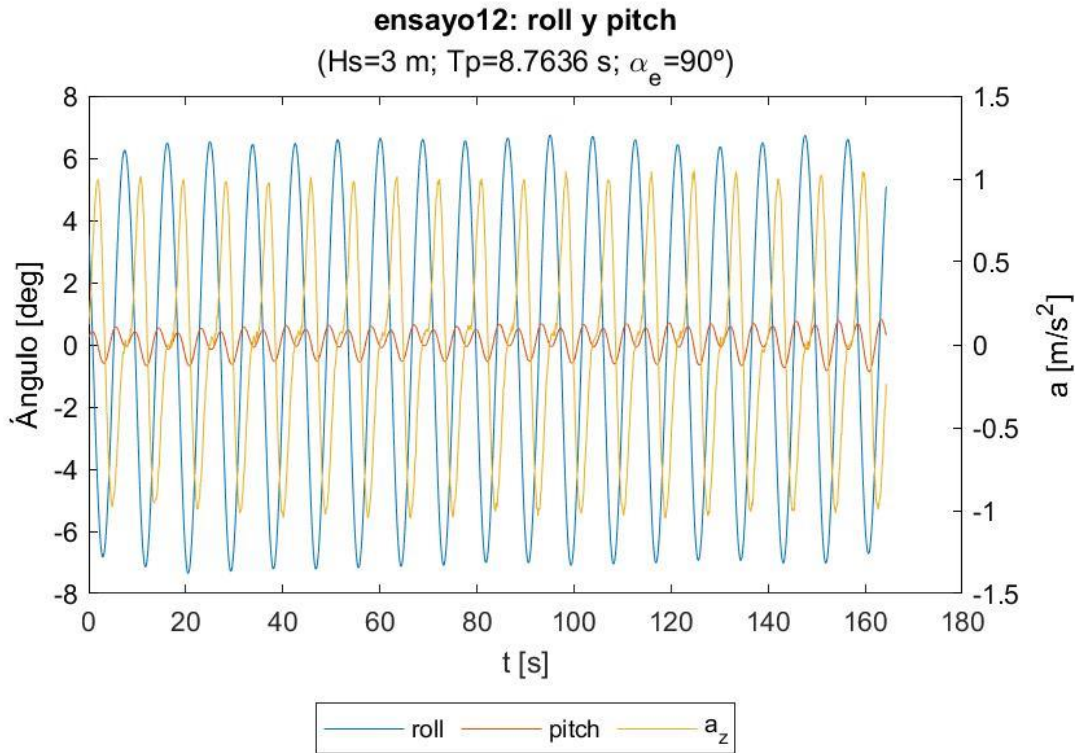


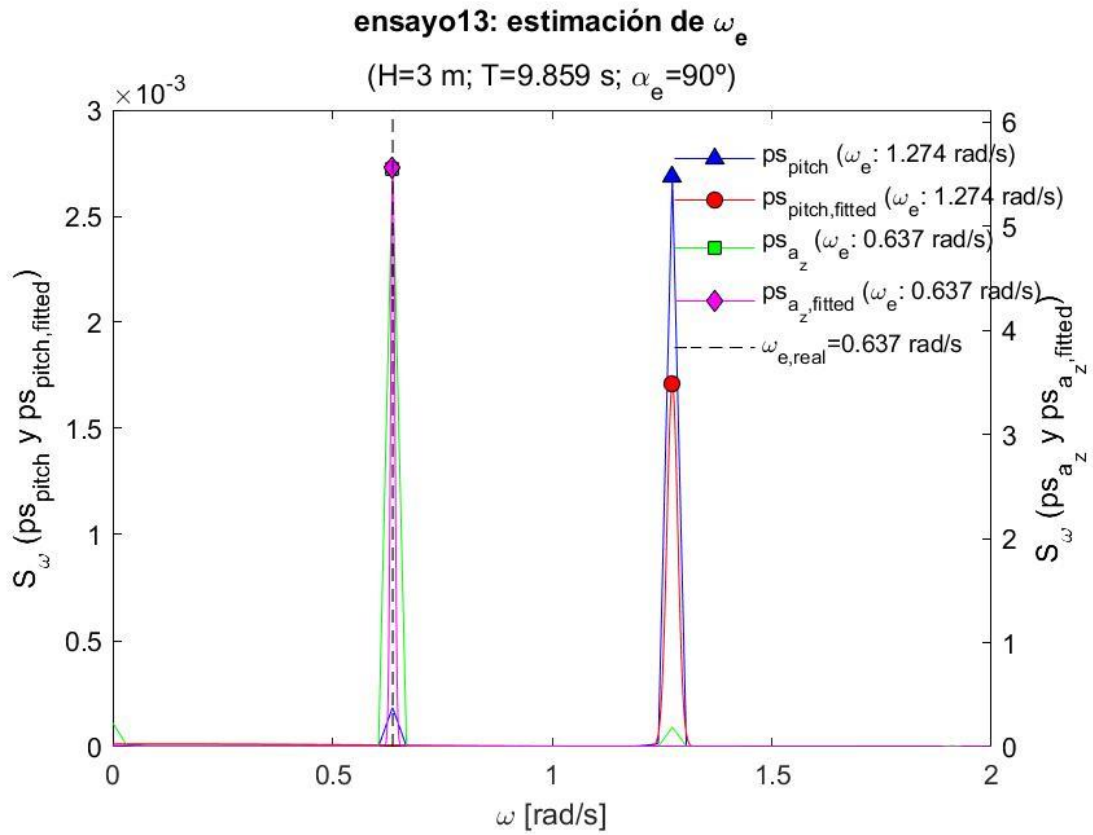
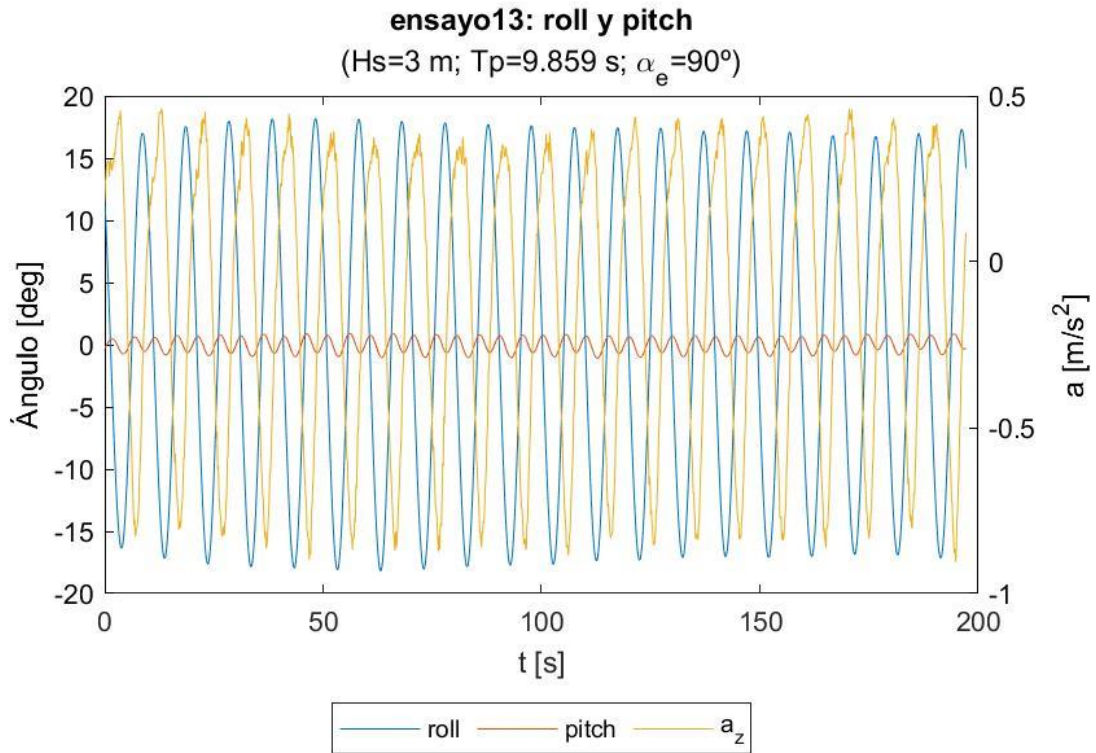


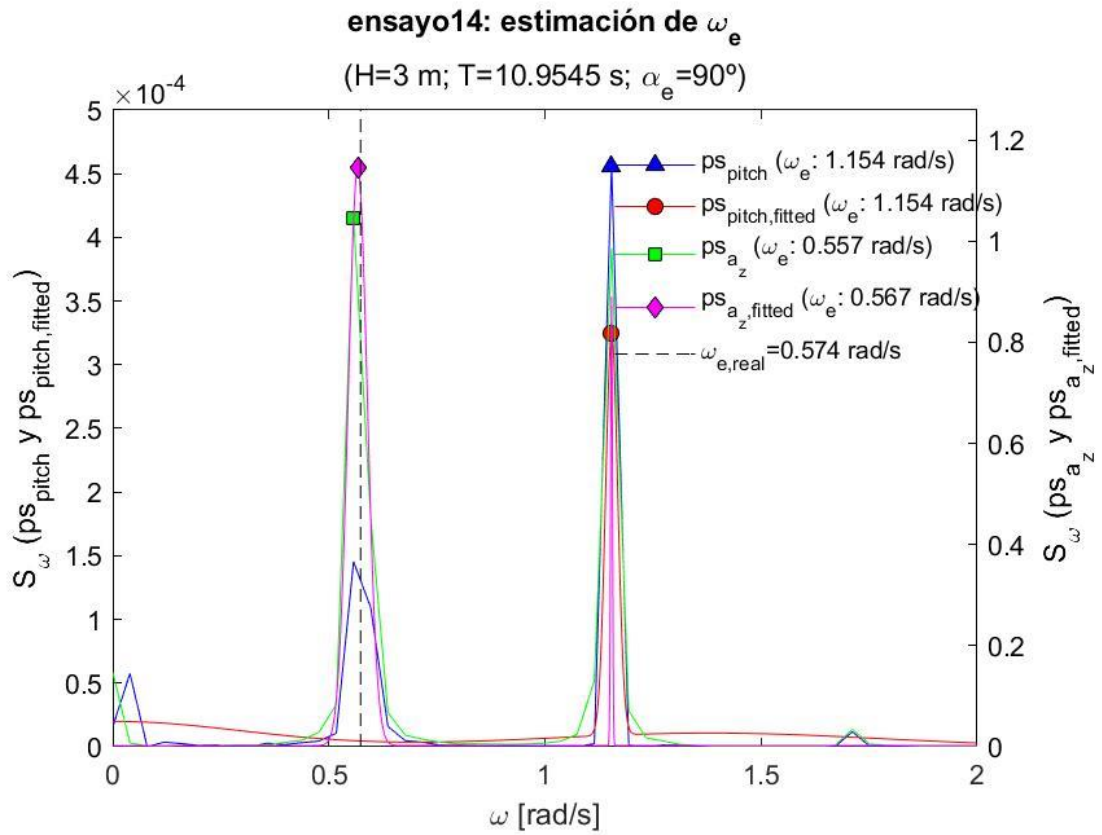
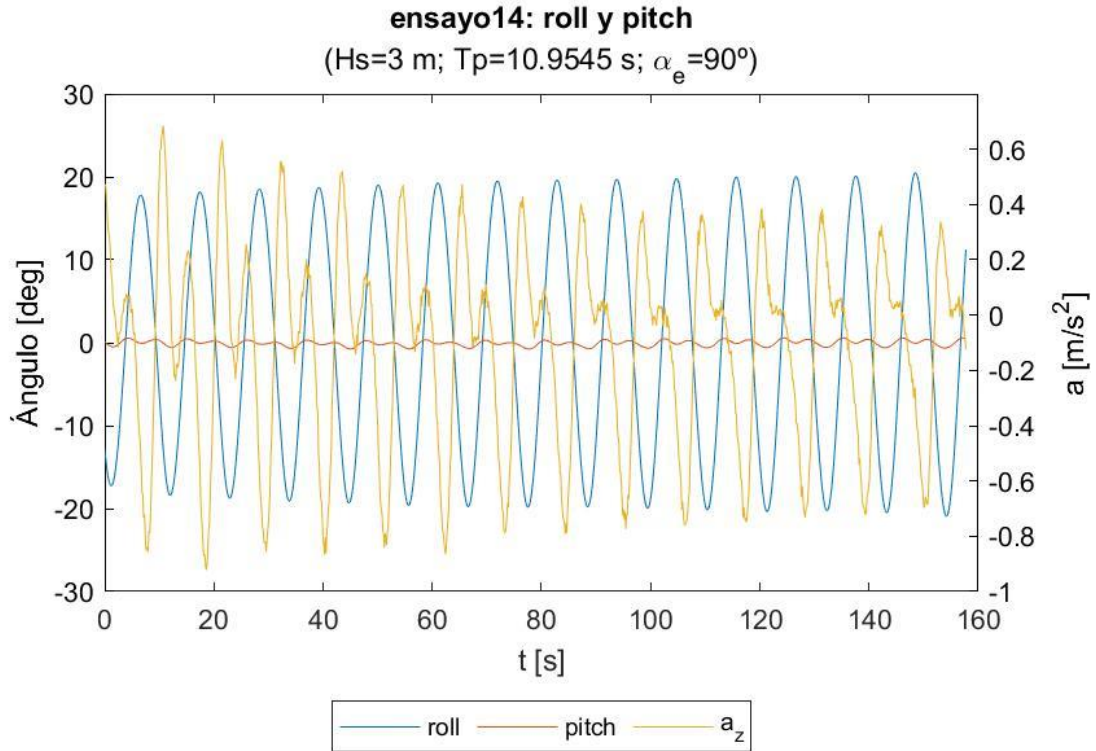


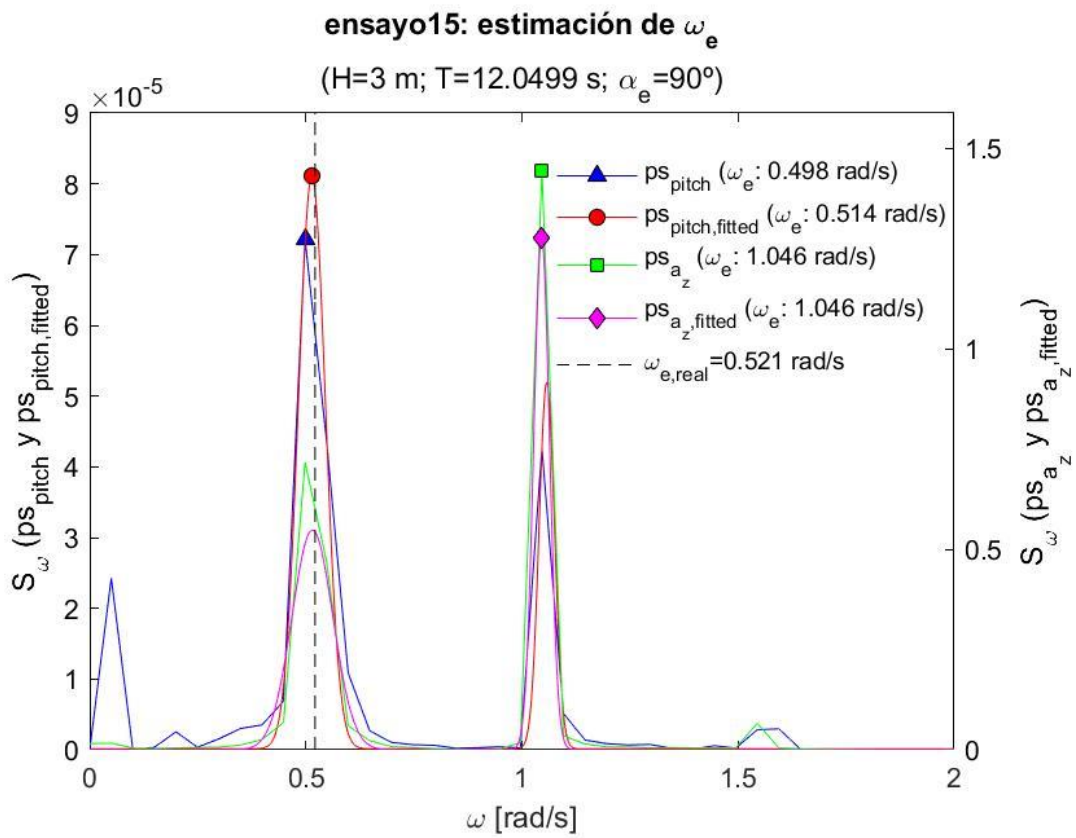
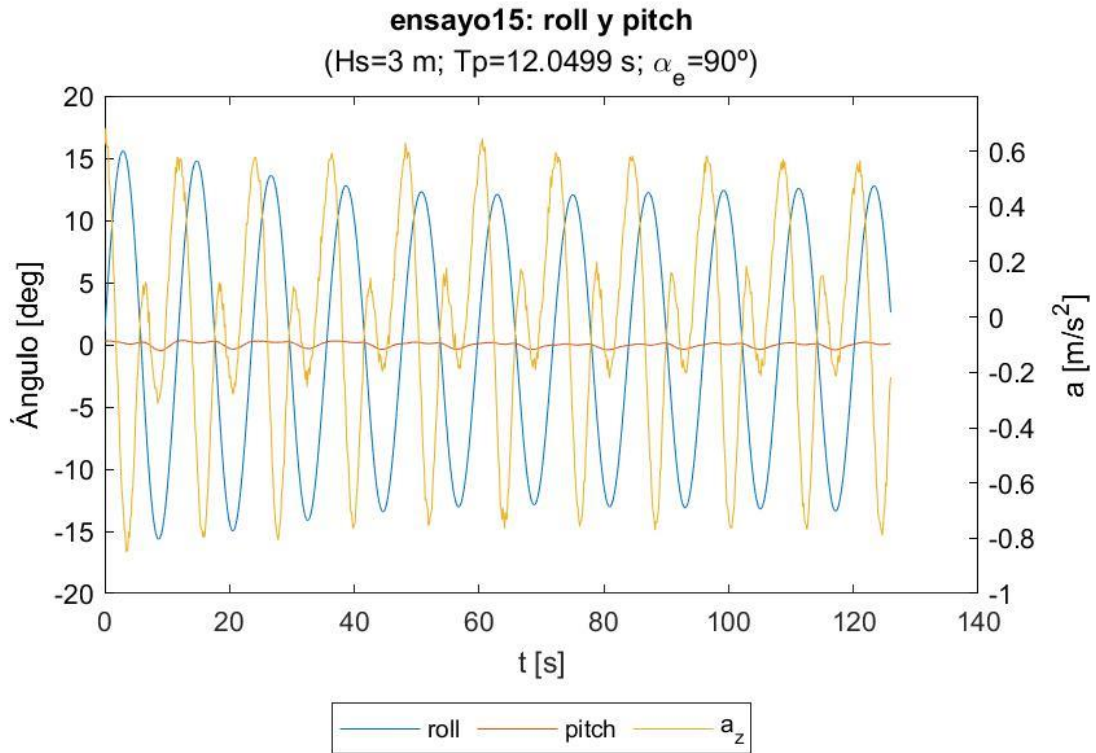


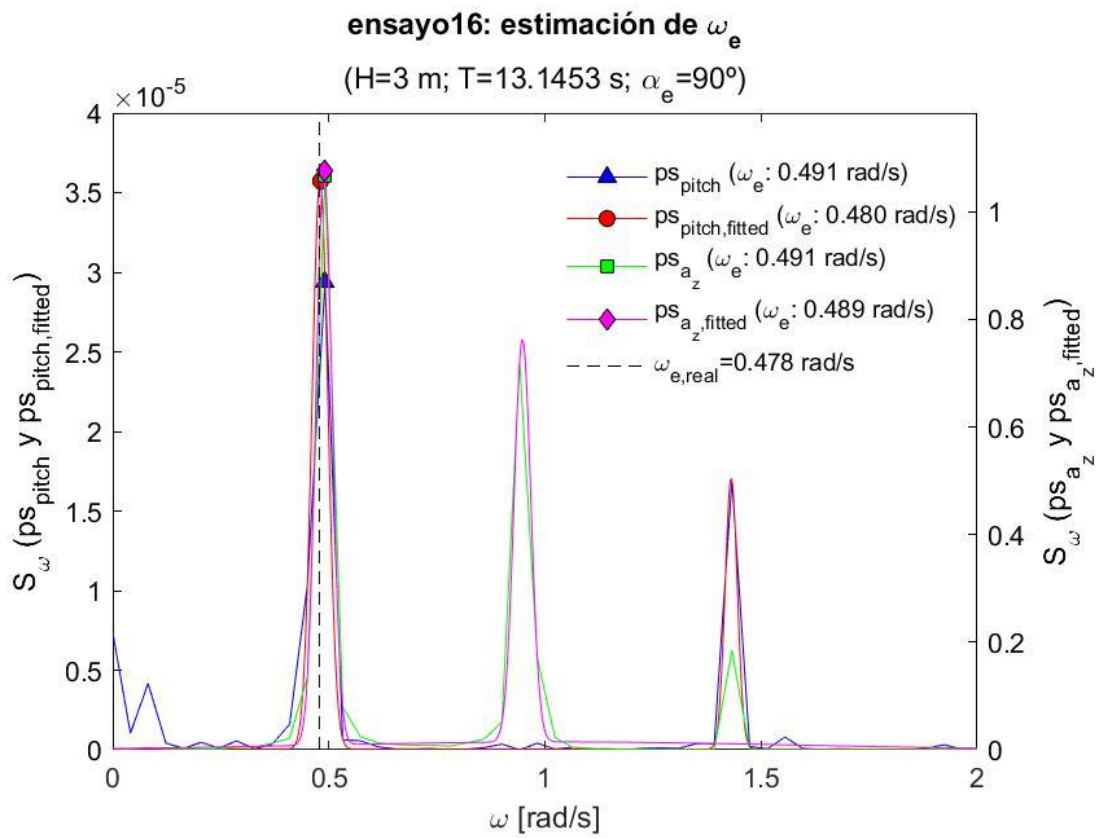
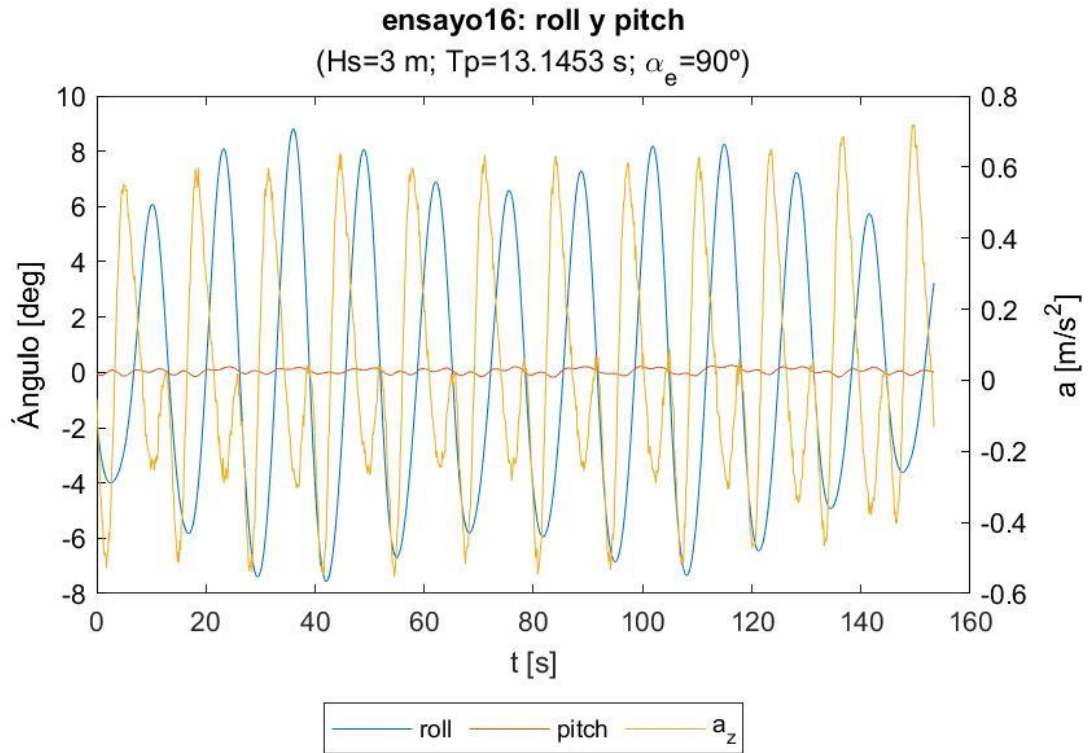


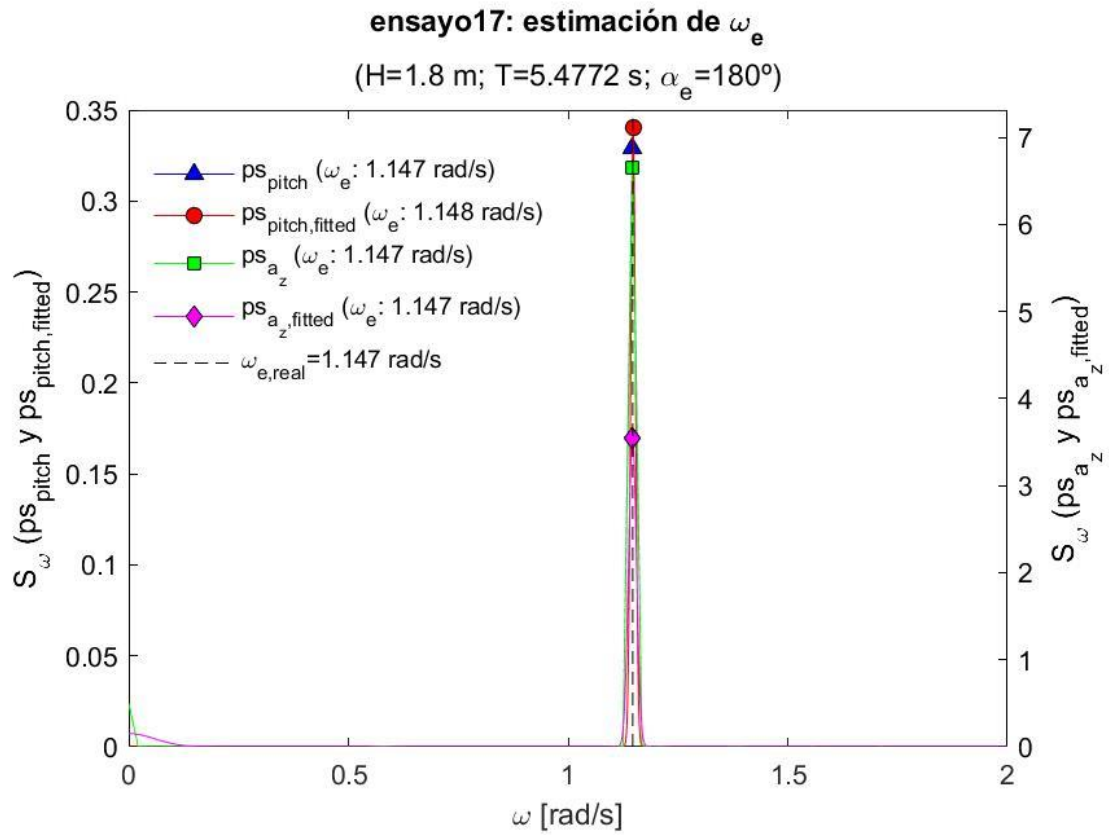
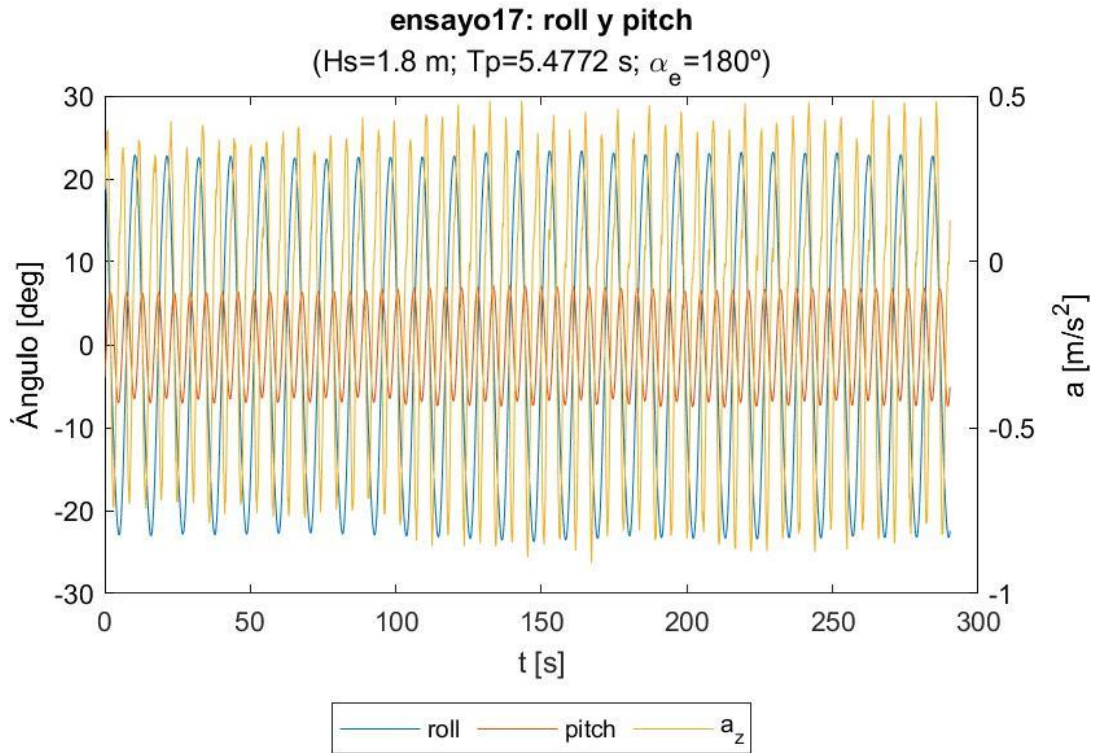


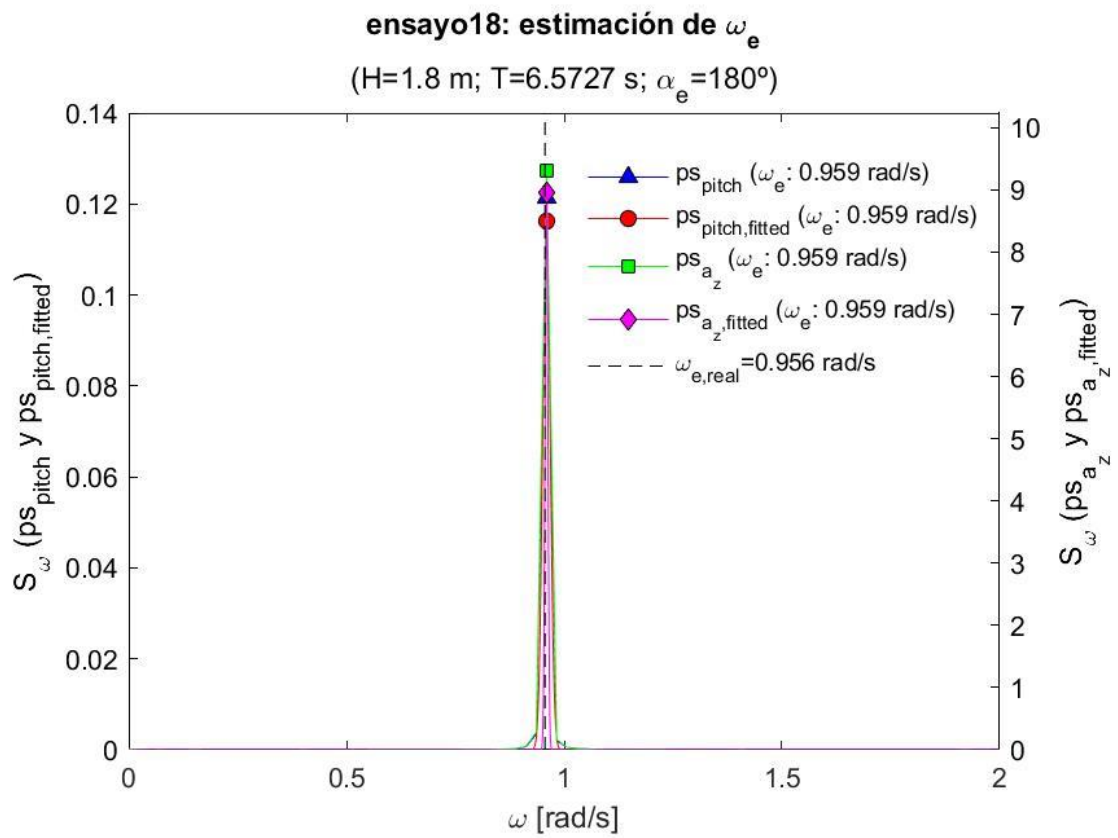
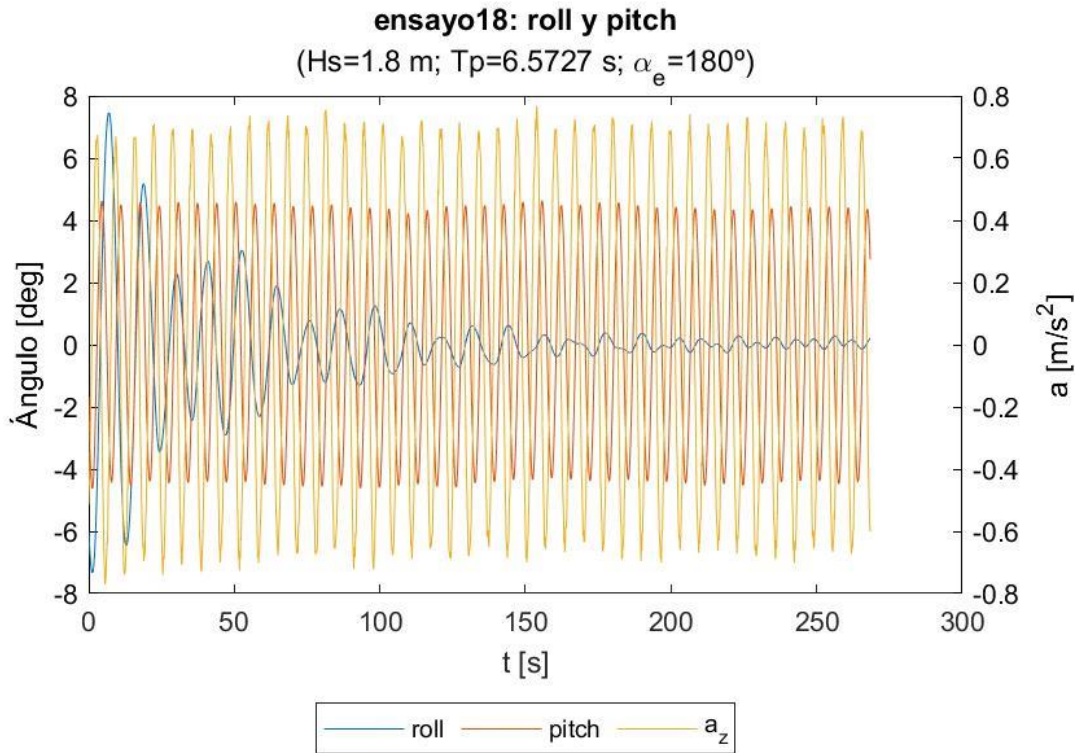


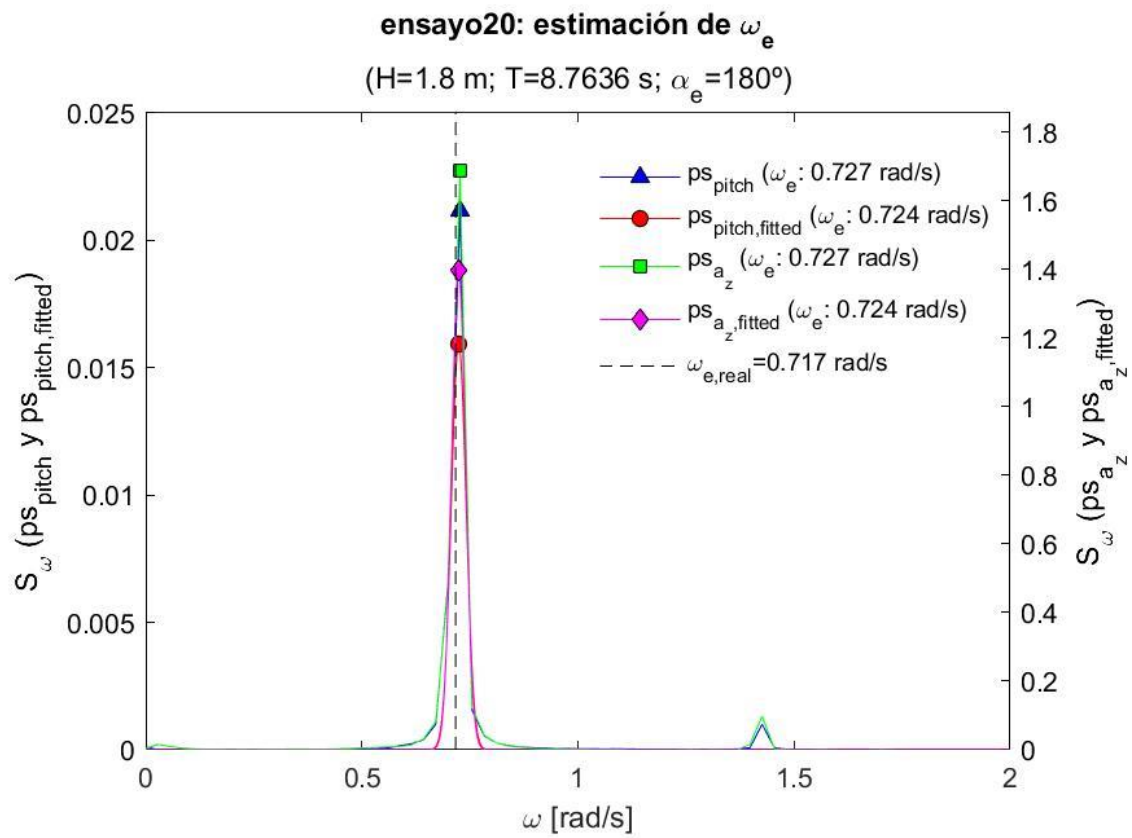
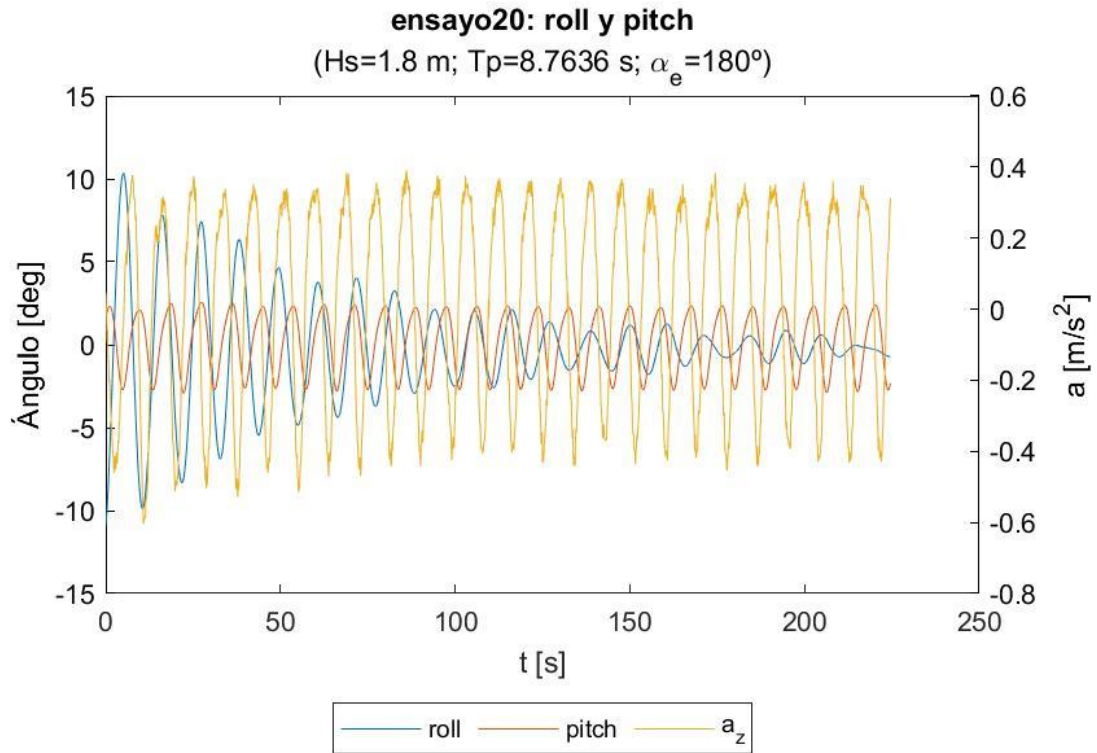


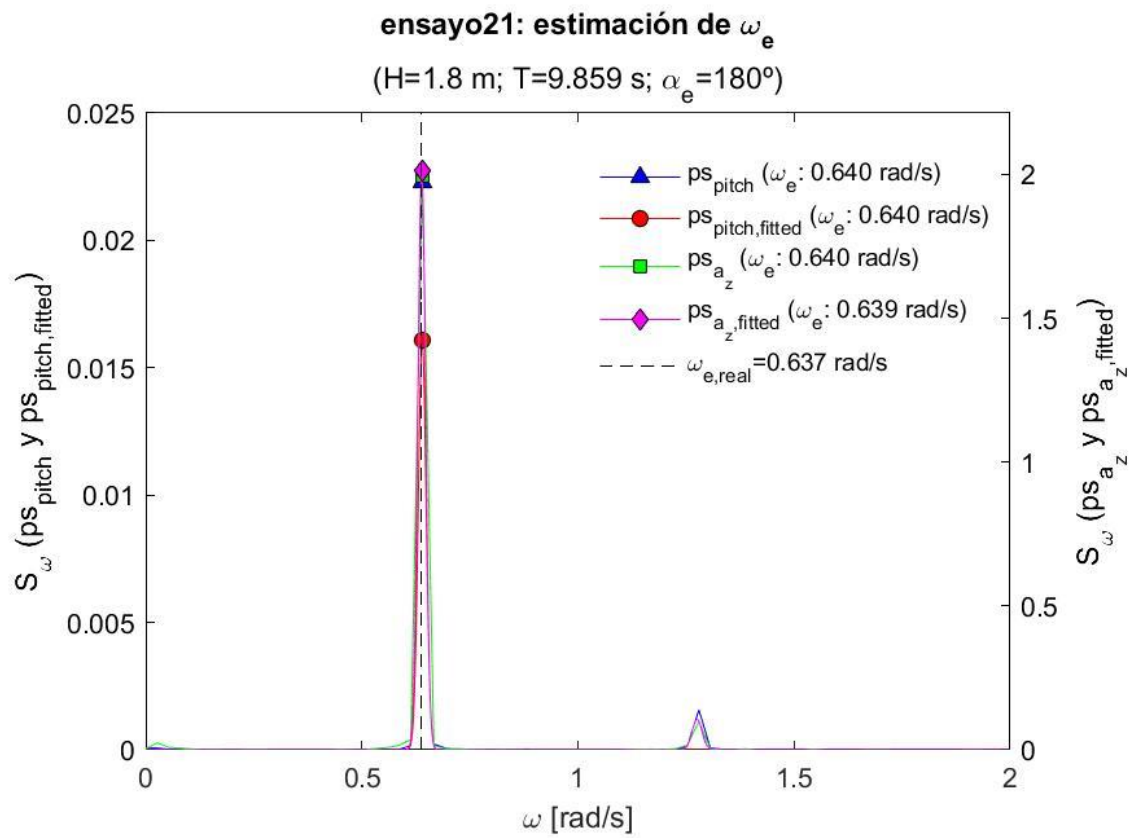
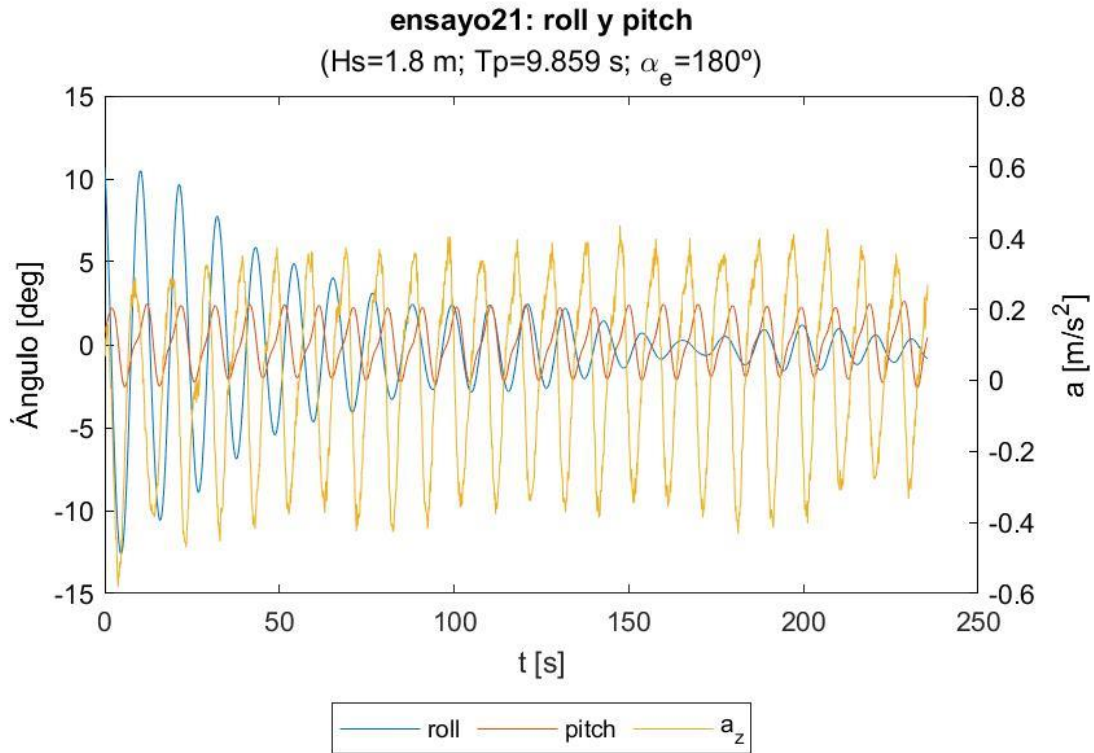


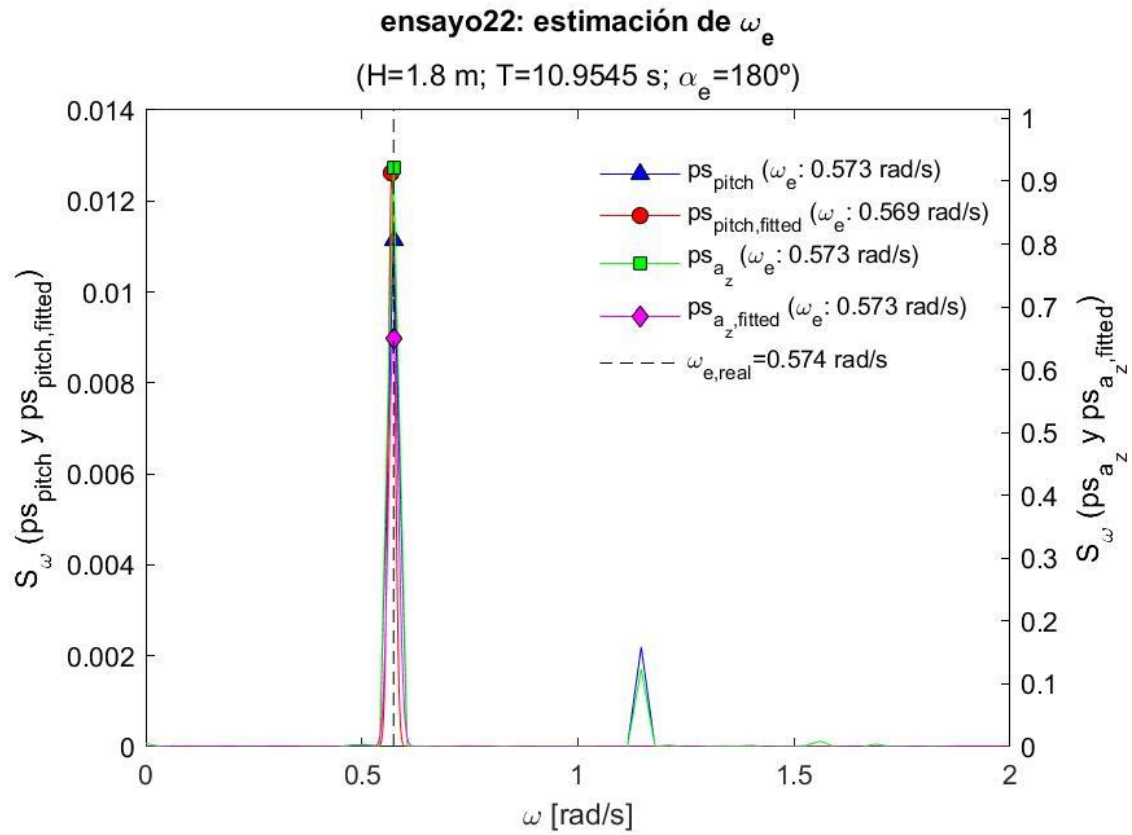
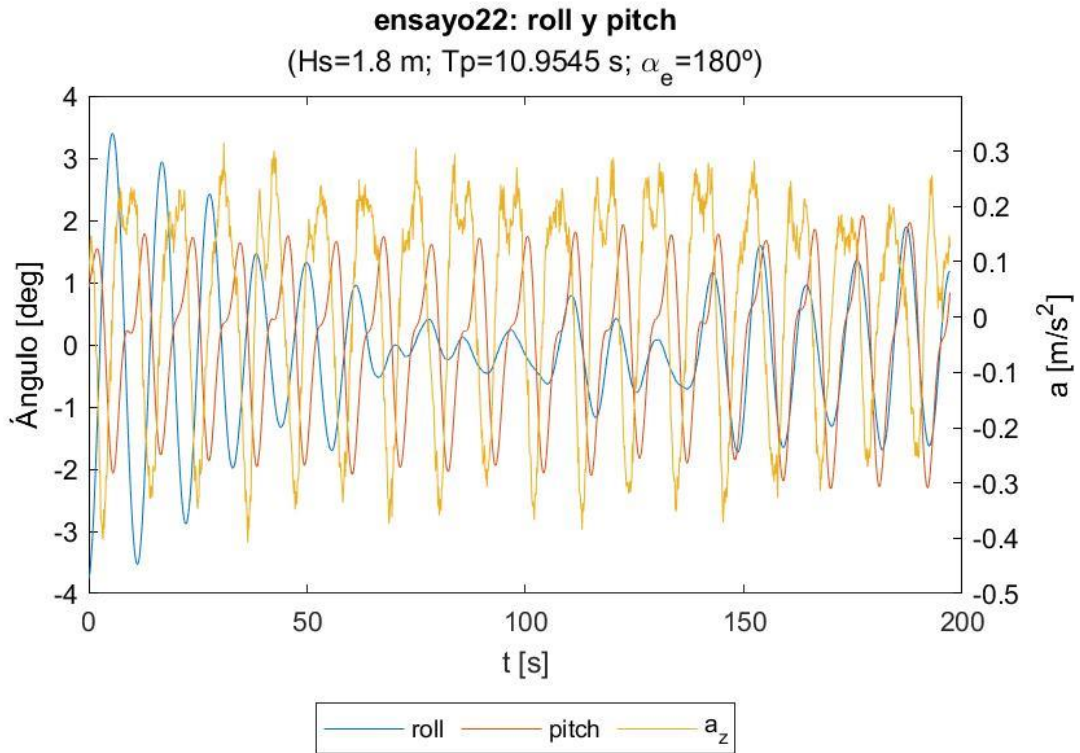


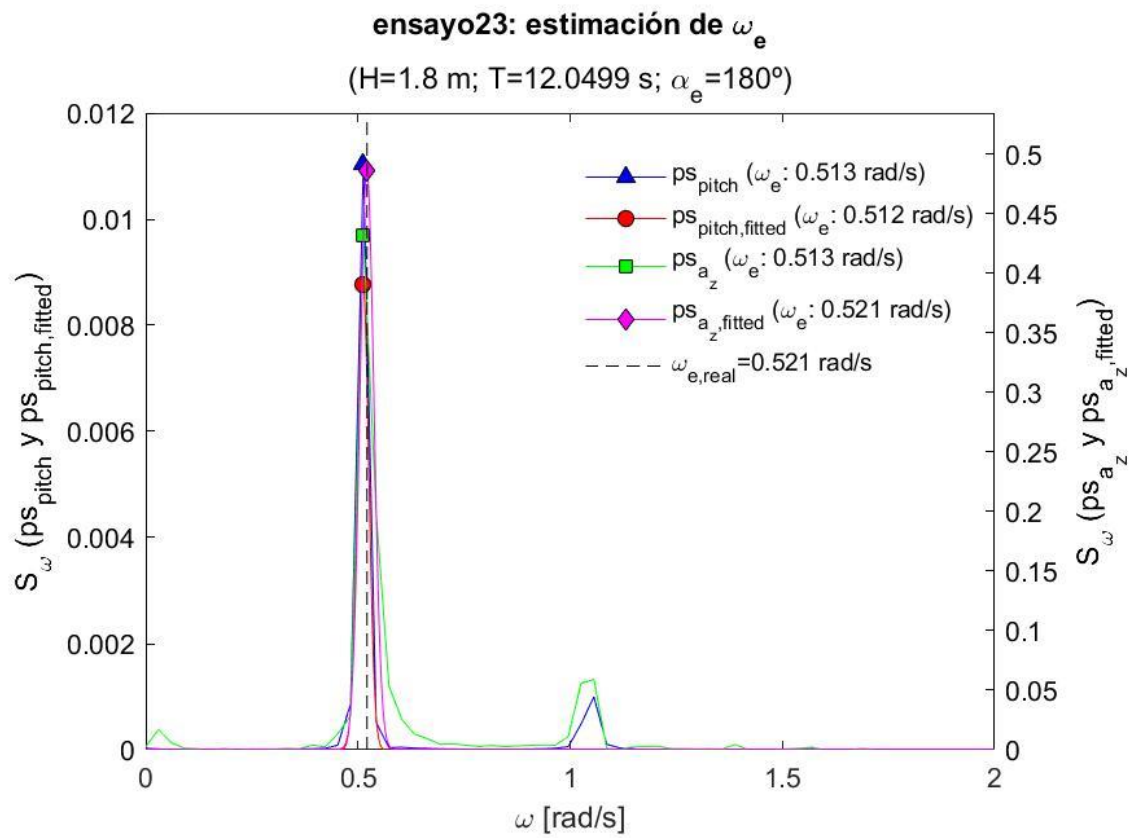
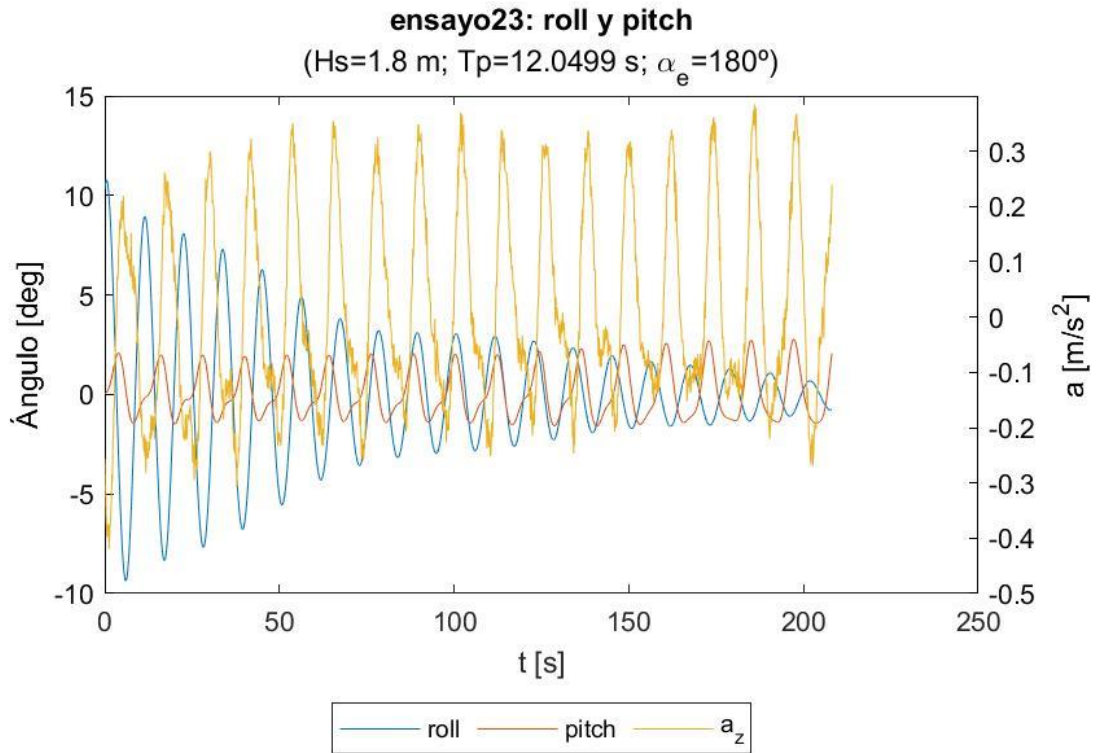


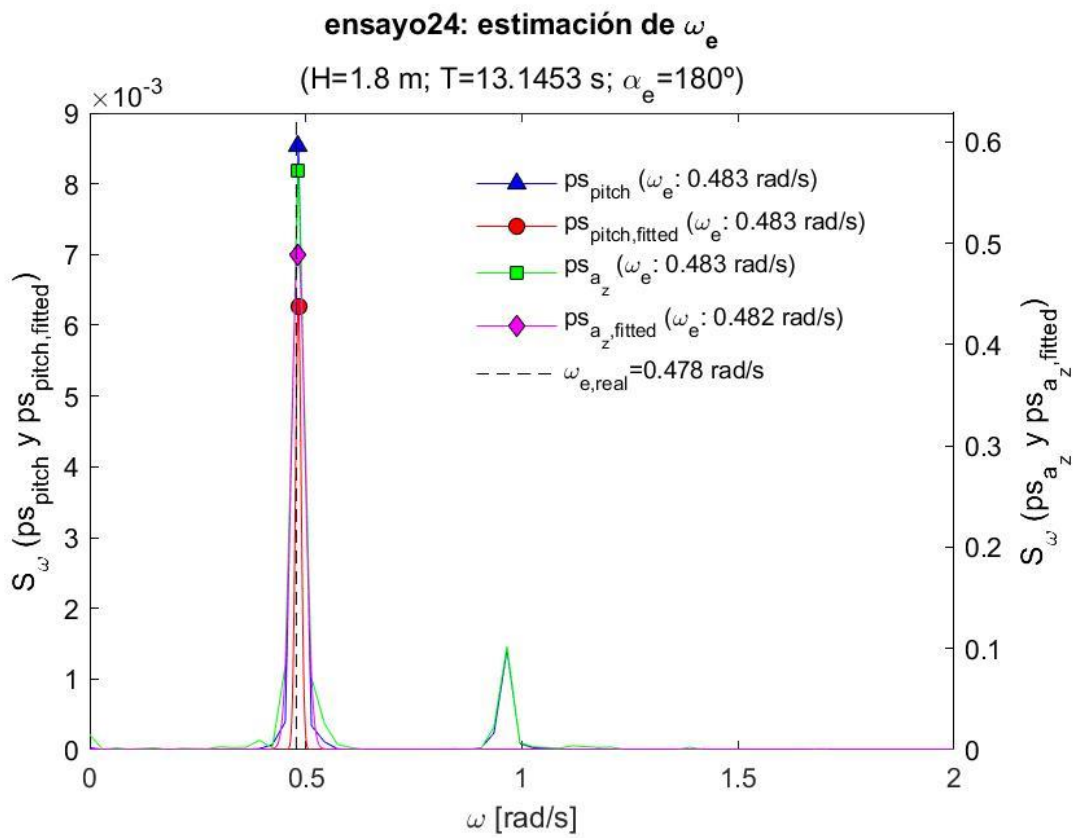
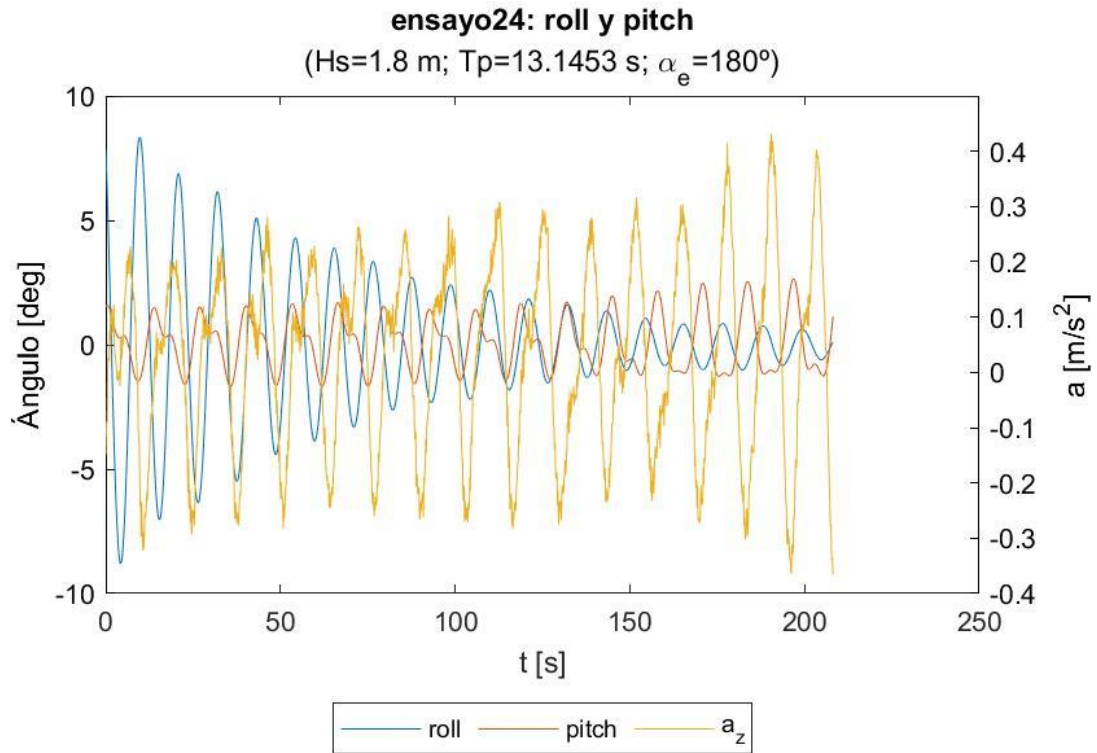


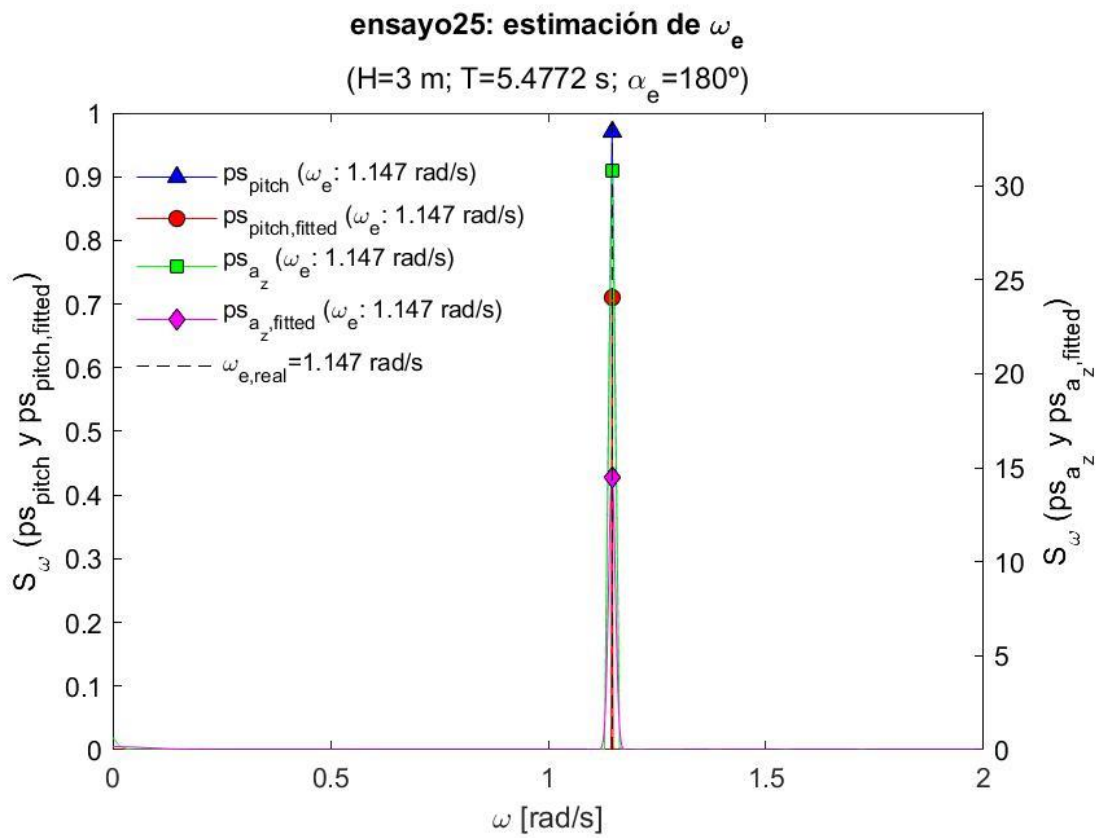
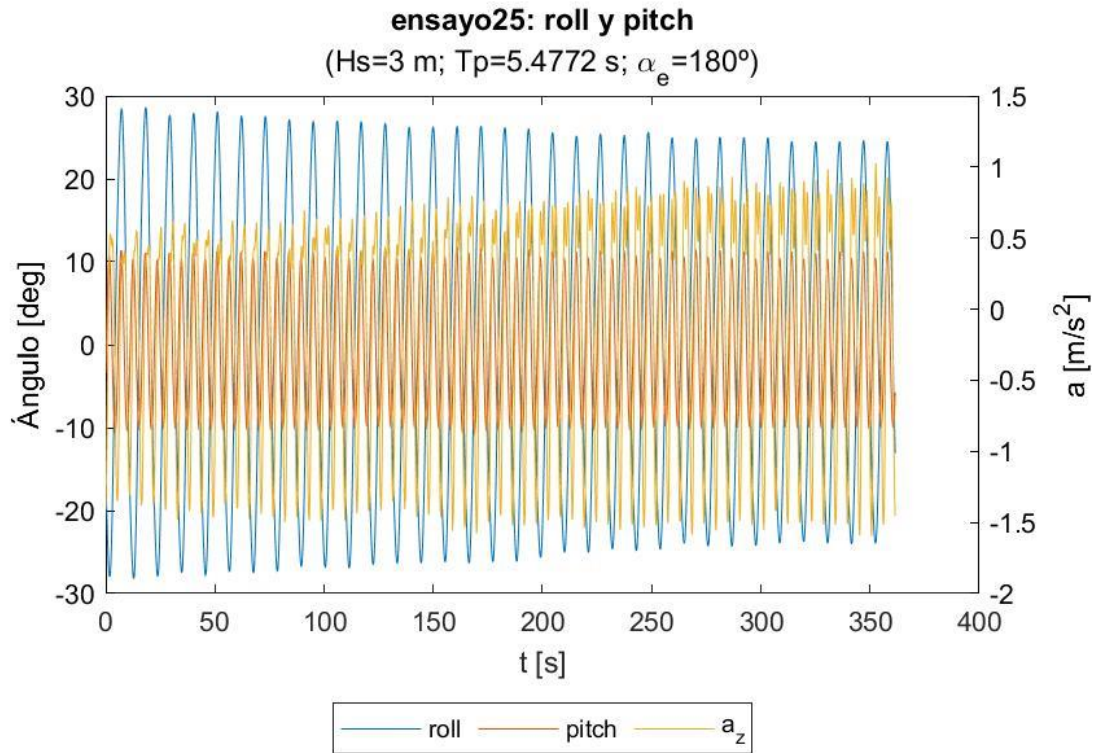


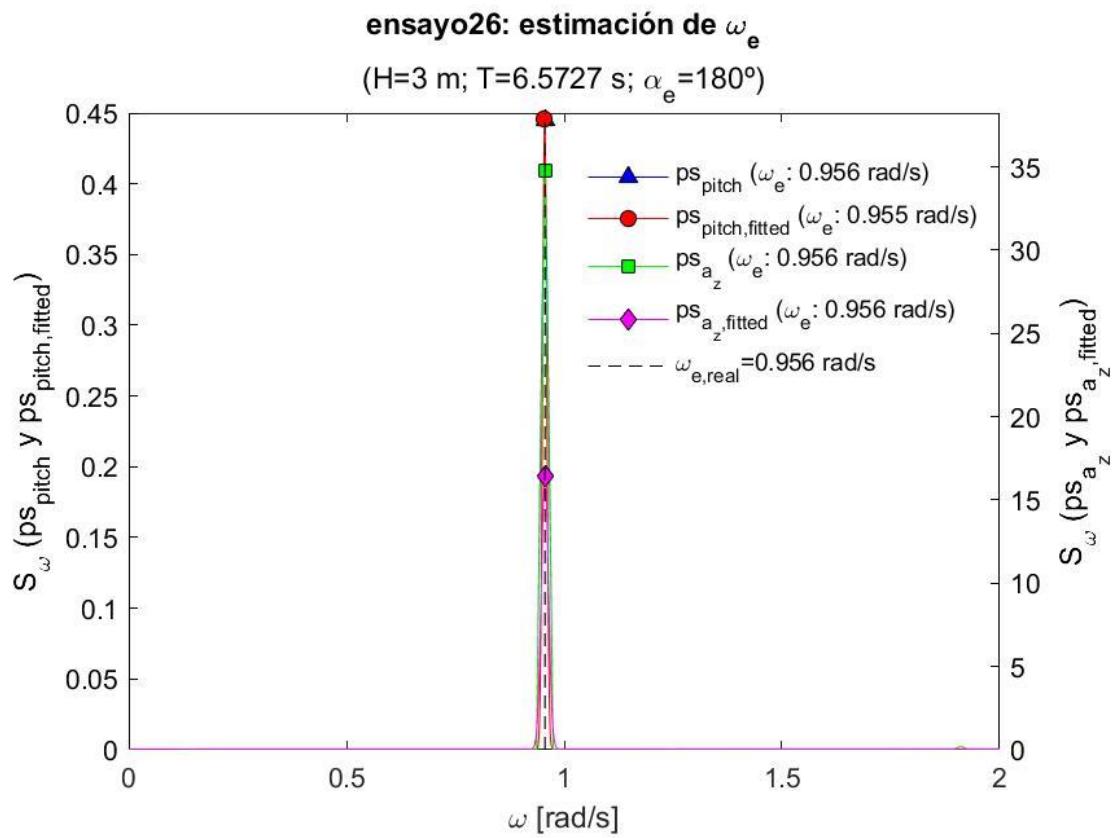
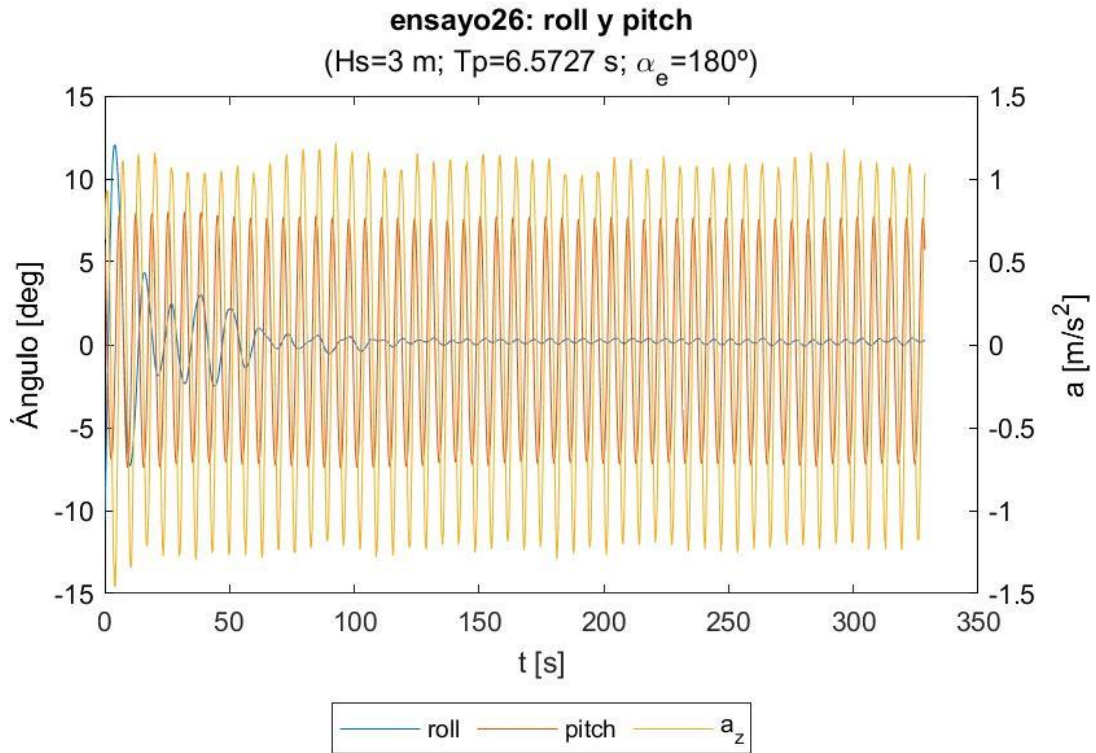


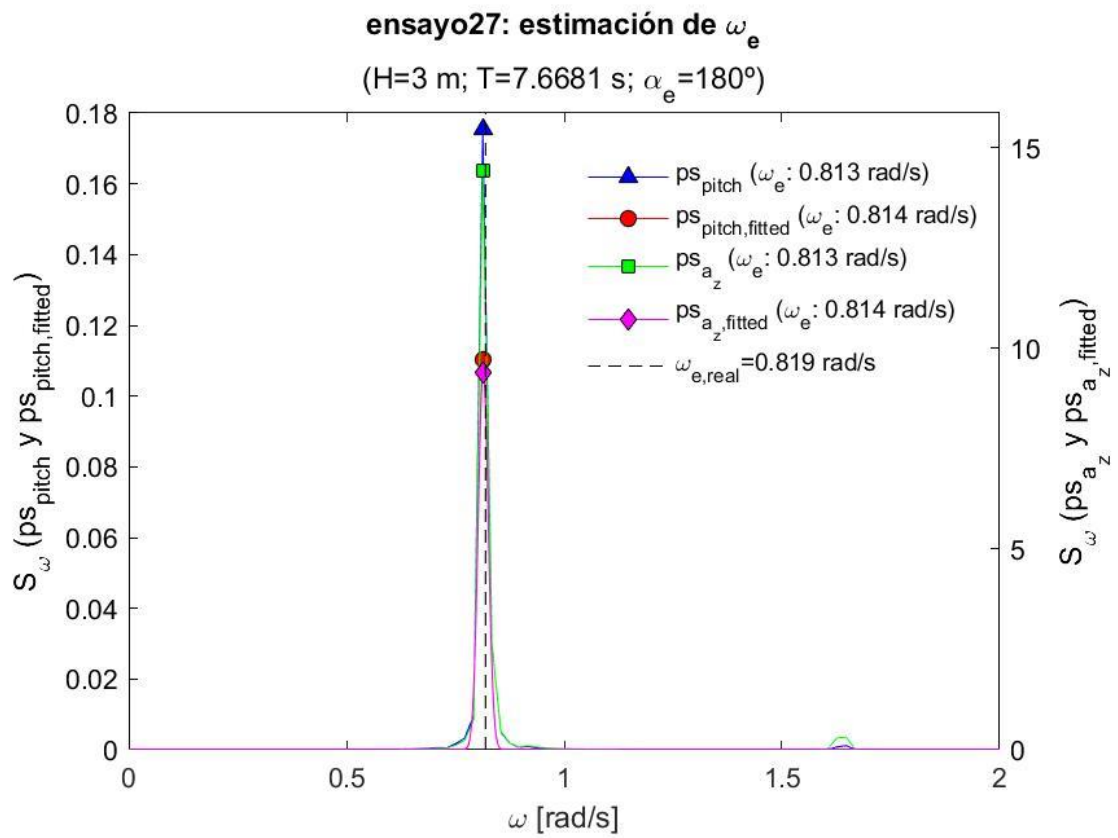
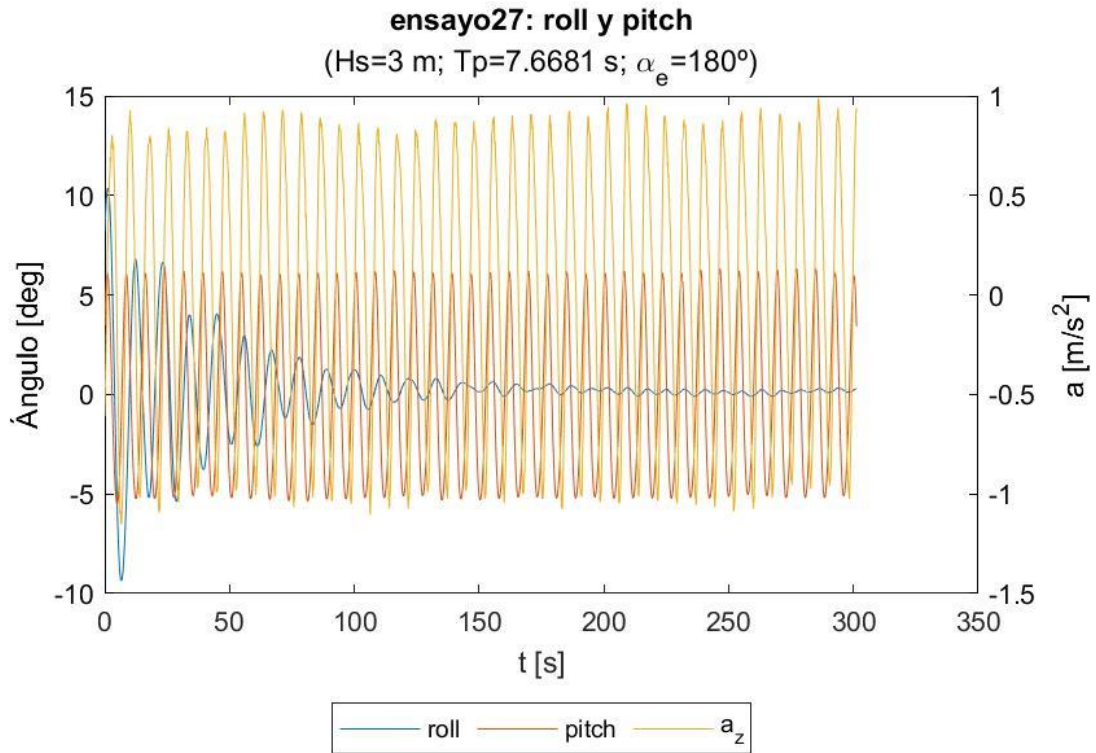


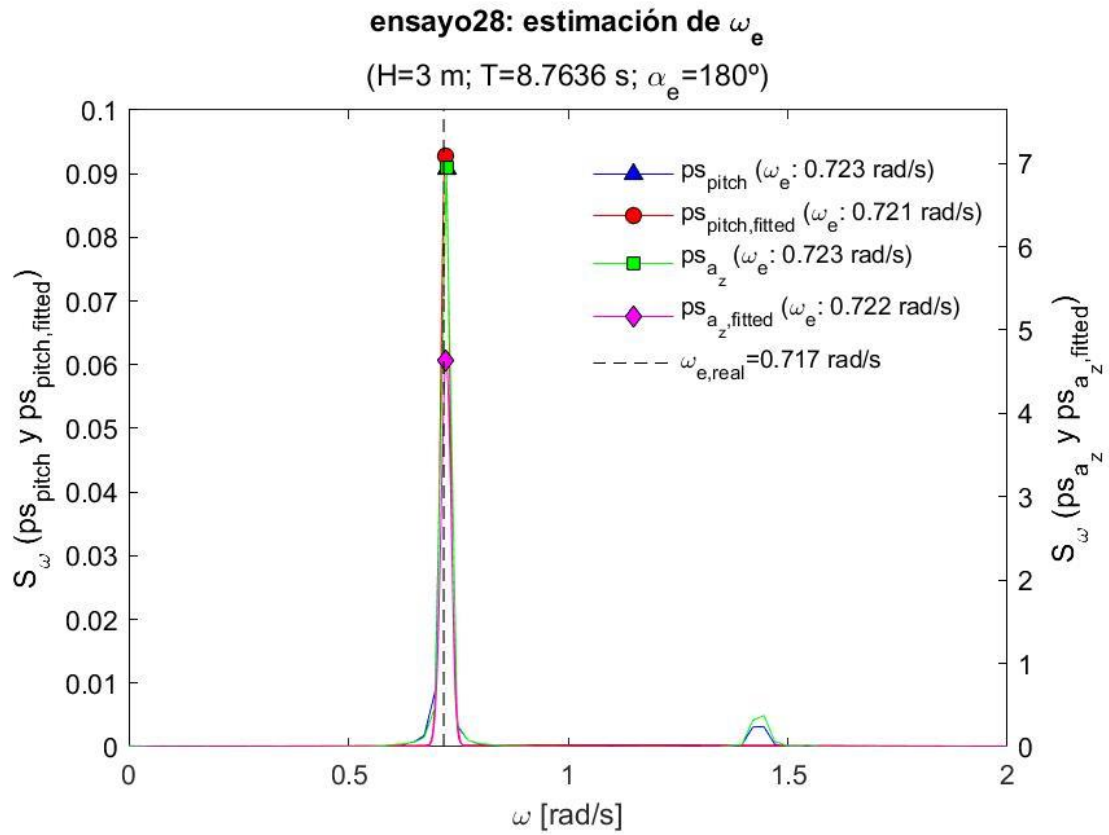
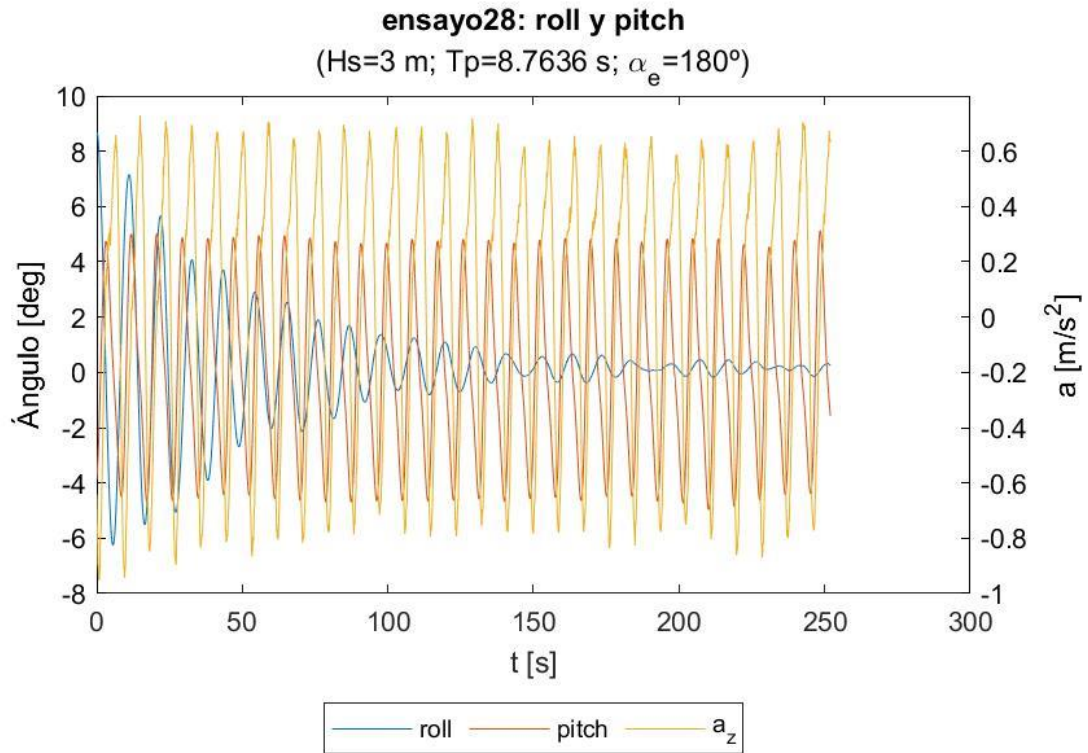


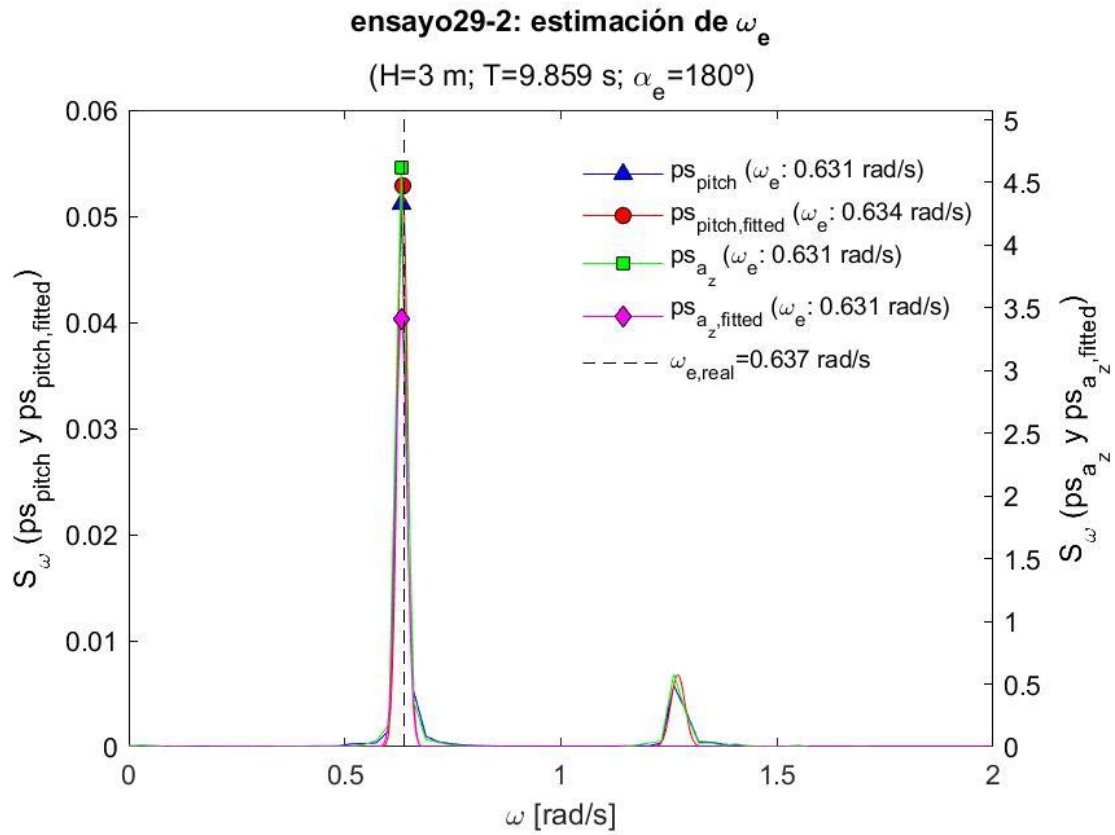
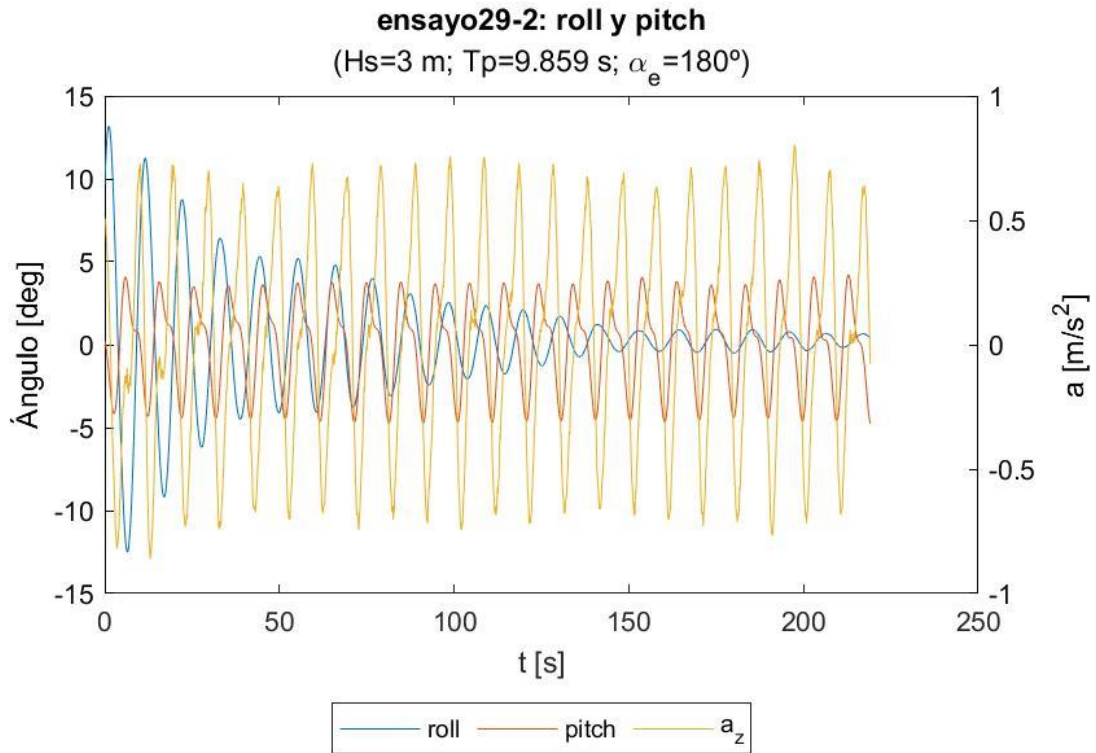


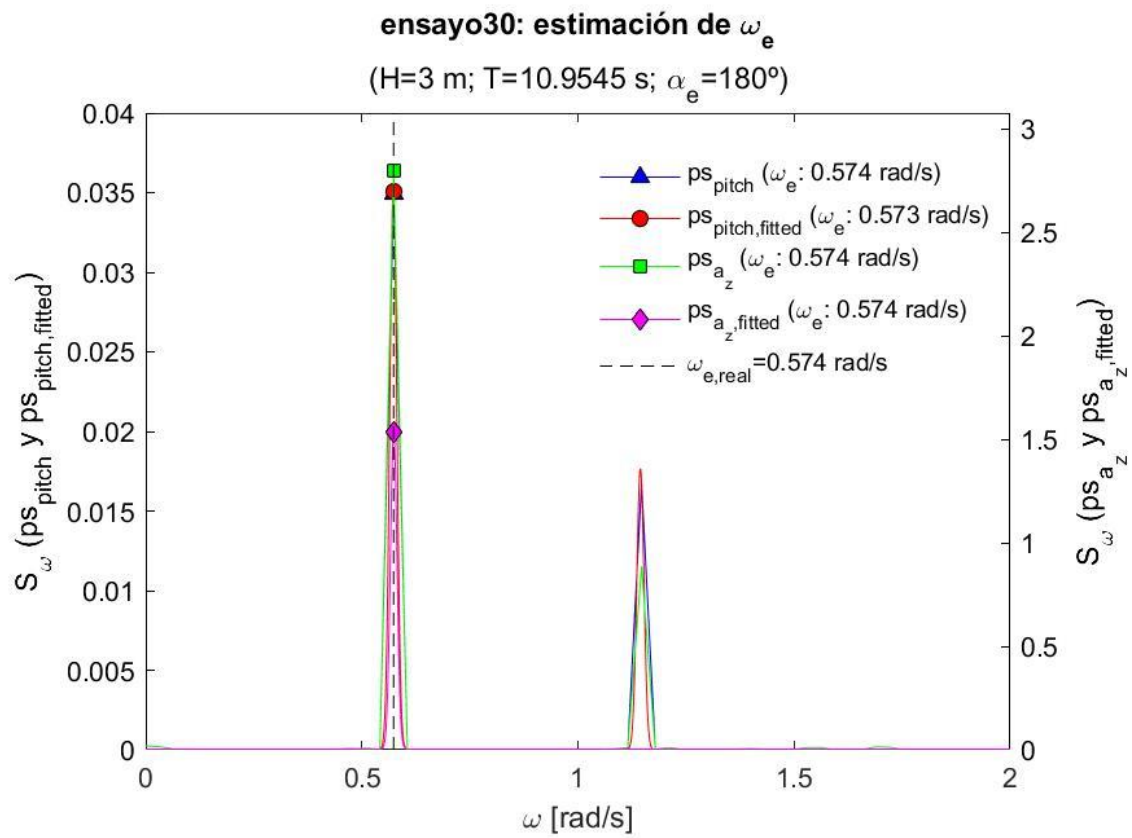
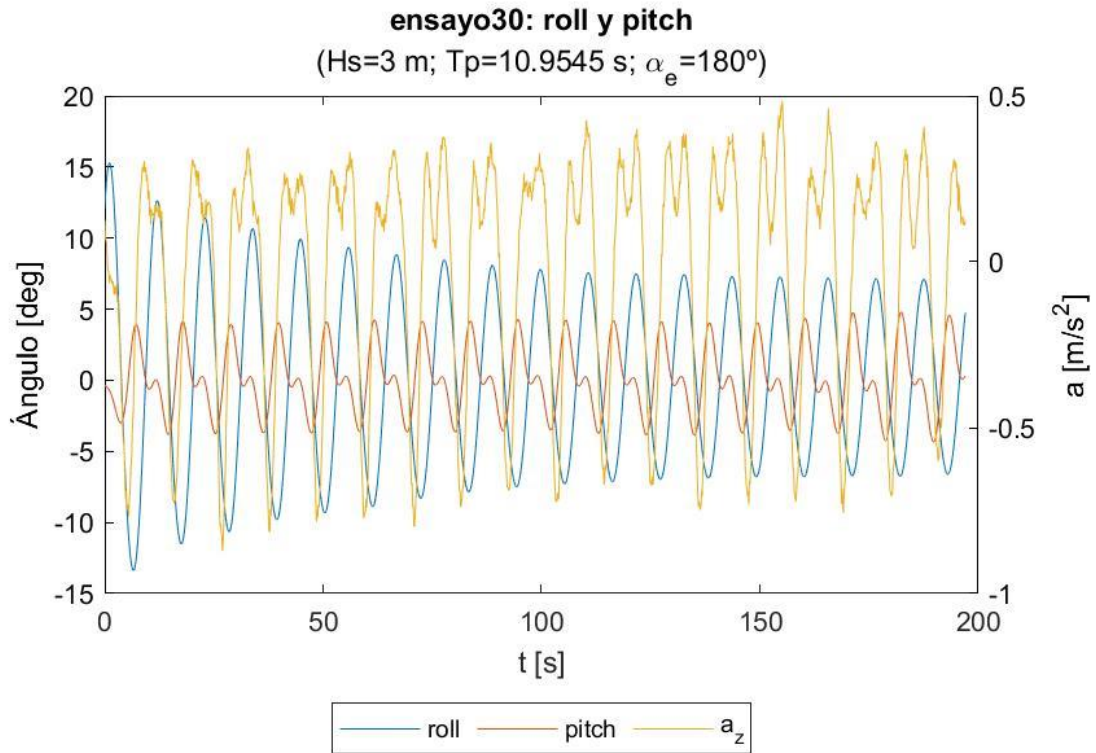


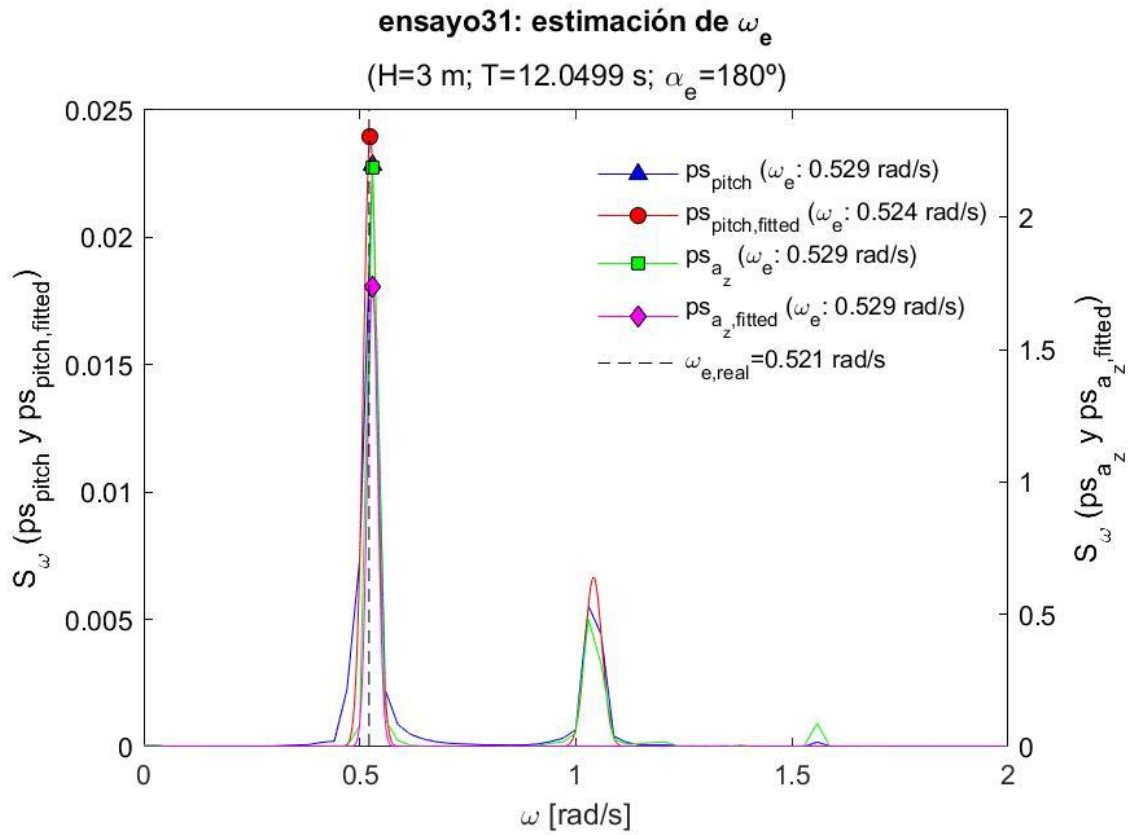
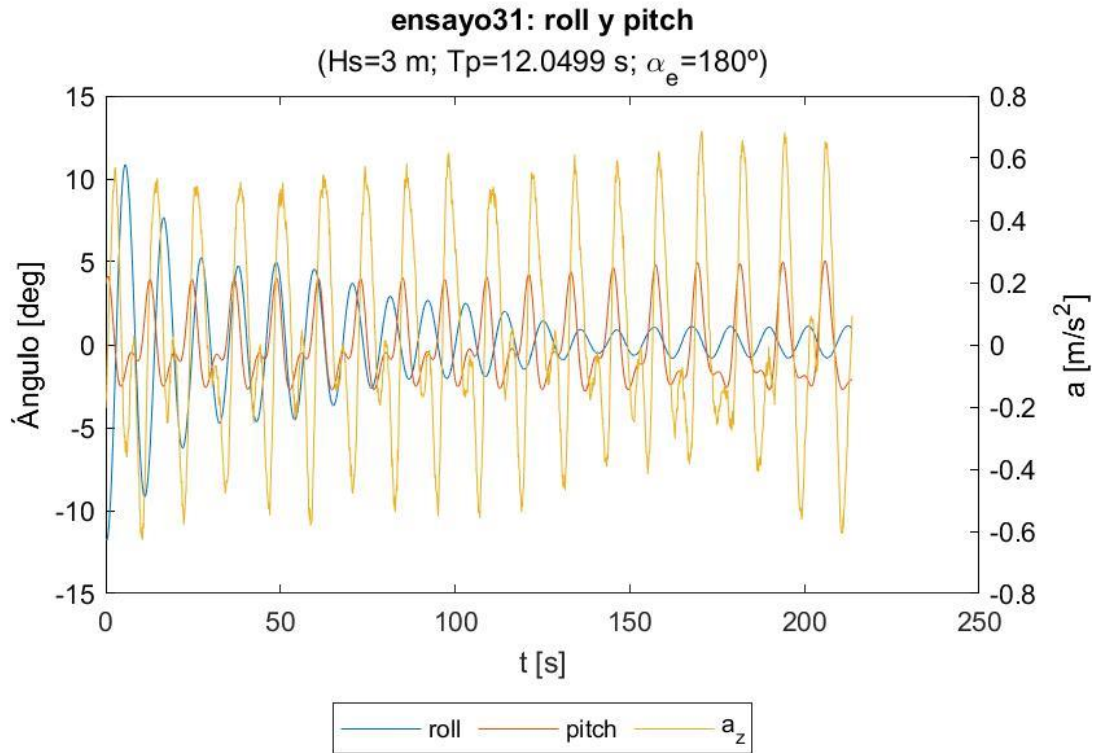


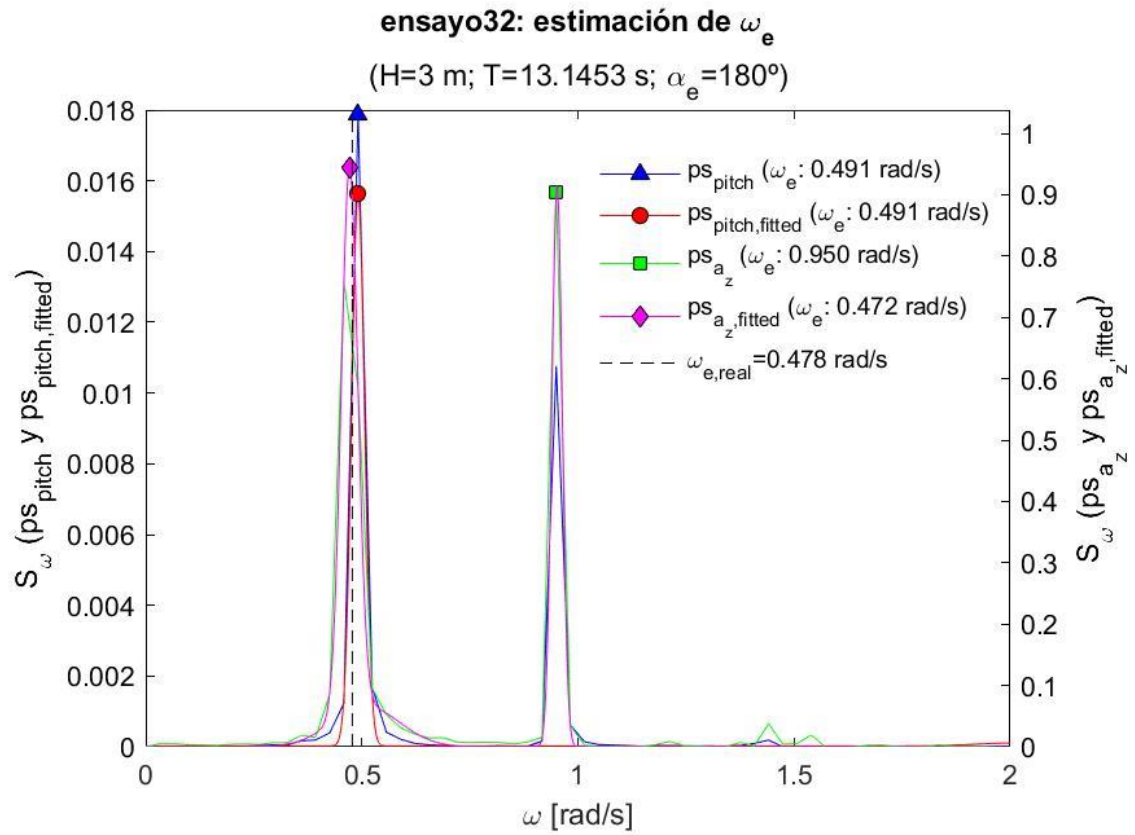
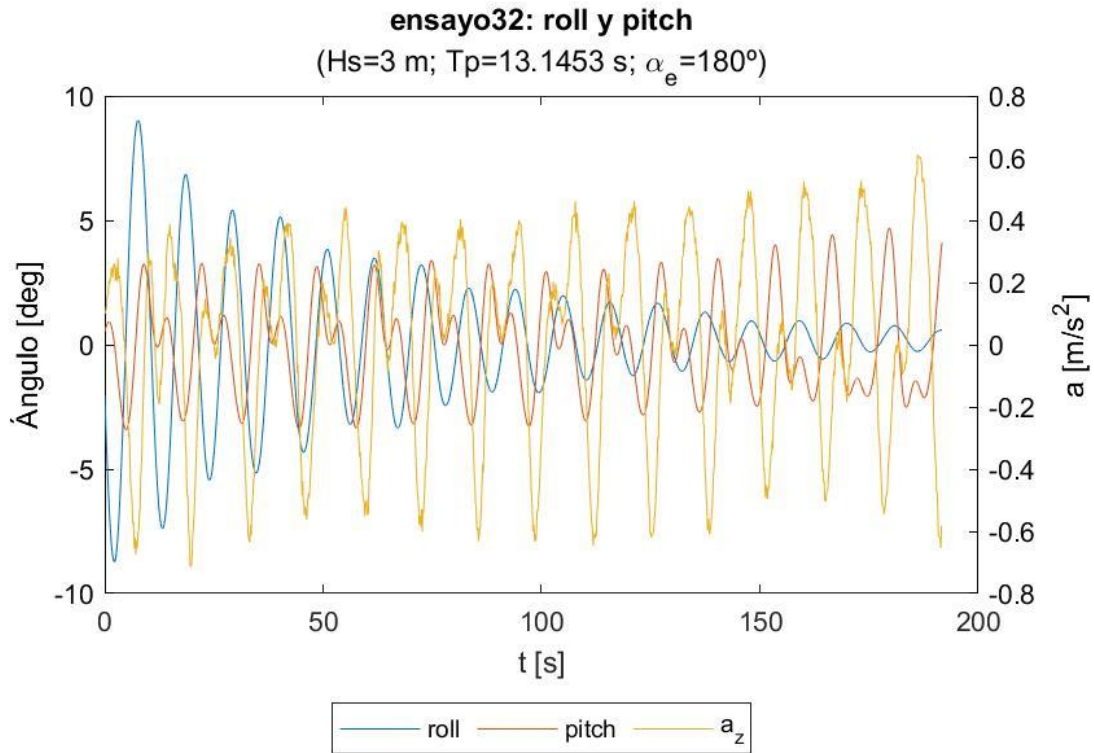












ANEXO 2. RESULTADOS DE ESTIMACIONES DE ω_0

En el presente anexo se adjuntan, para cada uno de los ensayos realizados:

- **Los cálculos para la obtención de ω_0^* con filtrado de ω_e^* .** Se presentan los distintos espectros filtrados obtenidos para cada segmento temporal considerado en el ensayo, marcando el valor tomado como máximo de la curva y que determina el valor de ω_0^* . También se representan los valores reales de ω_e y de ω_0 .
- **Los cálculos para la obtención de ω_0^* sin filtrado de ω_e^* .** Se presentan los distintos espectros sin filtrar obtenidos para cada segmento temporal considerado en el ensayo, marcando el valor tomado como máximo de la curva y que determina el valor de ω_0^* . También se representan los valores reales de ω_e y de ω_0 .
- **La evolución del error en la estimación de ω_0 a lo largo del tiempo.** Se presenta tanto el error de la estimación con filtro como la del programa original.

