



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Grado/Máster
CURSO 2017/2018

*Análisis numérico y experimental de la resonancia
paramétrica de un buque de pesca*

Máster en Ingeniería Naval y Oceánica

ALUMNA/O

Juan González Santomé

TUTORAS/ES

Marcos Míguez González

FECHA

FEBRERO 2018

RESUMEN

La resonancia paramétrica se trata de un fenómeno dinámico en el cual, para unas determinadas condiciones de mar longitudinal y tipo de buque, el mismo desarrolla grandes amplitudes de balance pudiendo dañar la carga que transporta, los tripulantes o pasajeros que se encuentran en la embarcación o incluso la pérdida del buque. A pesar de tratarse de una problemática de gran importancia, no existen prescripciones obligatorias redactadas por la IMO para evitarlo, ya que es de difícil predicción. Se han desarrollado sistemas para evitar llegar al fenómeno en condiciones establecidas. En el presente documento se tratará de abordar el problema mediante caracterización del mismo y experimentación con modelos matemáticos y físicos de una embarcación en concreto. Las características que influyen en el fenómeno se analizarán, siendo modeladas tanto de forma física como matemática. De esta manera se podrán obtener posibilidades de evitar, en menor o mayor medida, la resonancia paramétrica.

RESUMO

A resonancia paramétrica trátase dun fenómeno dinámico no cal, nunhas determinadas condicións de mar lonxitudinal e tipo de buque, desenvolve grandes amplitudes de balance puidendo danar a carga que trasporta, os tripulantes o pasaxeiros que poden encontrarse na embarcación ou incluso a perda do buque. A pesar de tratarse dunha problemática de grande importancia, non hai prescricións obrigatorias redactadas pola IMO para evitalo, xa que é difícil de predecir. Desenvolvéronse sistemas para evitar chegar o fenómeno nunhas condicións establecidas. No presente documento tratarase de abordar o problema mediante a caracterización do mesmo e experimentación con modelos matemáticos e físicos dunha embarcación concreta. As características que infúen no fenómeno analizaránse, sendo modelados tanto de forma física como matemática. Desta forma poderanse obter posibilidades de evitar, en menor ou maior medida, a resonancia paramétrica.

ABSTRACT

Parametric roll is a dynamic phenomenon generated by mainly in longitudinal seas conditions and for a given set of specific vessel characteristics. Under this phenomenon, the vessel will start to experience large roll angles which may lead to cargo damage, injure crew or passengers and even damage the vessel itself. Although the phenomenon can lead to severe problems, there are no IMO general guidelines in order to avoid it, due to its unpredictable nature. Systems capable of predict the possibility of parametric roll in established conditions have been developed. In the present document, the problem of parametric roll will be defined by characterization and experimentation with mathematical and physical models. A specific ship will be used in the analysis. The characteristics that affect the phenomena will be analysed, physically and mathematically, in order to know how they can help to prevent parametric resonance.

Índice

1	Introducción	9
1.1	Objetivos del presente trabajo	10
2	Resonancia paramétrica	11
2.1	Historia de la resonancia paramétrica	11
2.2	Modelado matemático de la resonancia paramétrica en buques (modelo simplificado).....	13
2.3	Modelación matemática de la resonancia paramétrica en buques (modelo no lineal).....	23
2.4	Tipos de buques susceptibles y antecedentes	24
3	Análisis de la resonancia paramétrica.....	32
3.1	Modelo matemático.....	36
3.1.1	Modelo matemático simplificado	36
3.1.1.1	Obtención de los valores GM_0 y GM_a	42
3.1.1.2	Obtención de los valores I_{xx} y A_{44}	49
3.1.1.3	Obtención de los valores B_{44a} y B_{44b}	54
3.1.1.4	Resultados	57
3.1.2	Modelo matemático no lineal	61
3.1.2.1	Obtención de los valores de GZ	61
3.1.2.2	Resultados	63
3.2	Modelo físico. Ensayos en canal.....	66
3.2.1	Prueba de estabilidad	68
3.2.2	Ensayo de decaimiento.....	71
3.2.3	Ensayos en canal	76
3.2.4	Resultados.....	83
3.3	Comparación entre resultados obtenidos.....	89
3.3.1	Resultados ensayo – modelo matemático simplificado	89
3.3.2	Resultados ensayo – modelo matemático no lineal	95
3.3.3	Resultados ensayo – modelos anteriores	102
4	Conclusiones	105
5	Referencias bibliográficas	107
	ANEXOS.....	114
	Anexo 1 – Script Visual Basic obtención de GM	114
	Anexo 2 – Matrices resumen GM	117

Anexo 3 – Cartilla de trazado utilizada en Amarcon Octopus Office.....	121
Anexo 4 – Valores de masa añadida (A44, A42, A22) 4	128
Anexo 5 – Script modelo matemático ensayo de decaimiento	131
Anexo 7 – Script de modelo simplificado	137
Anexo 8 – Script Visual Basic para obtención de brazos adrizantes	142
Anexo 9 – Script modelo no lineal 9.....	145
Anexo 10 – Generación de matrices GZ para introducir en el script no lineal 10.....	151
Anexo 11 – Comparación de resultados 11	156

Simbología utilizada

[M]: Matriz de masas

[A]: Matriz de masas añadidas

\vec{s} : Vector referente a grado de libertad

[B]: Matriz de amortiguamiento

[C]: Matriz de coeficientes de recuperación

$\overrightarrow{F_{ext}}$: Matriz de fuerzas externas de los diversos grados de libertad

I_{xx} : Inercia del buque en el eje X

A_{44} : Coeficiente de amortiguamiento (del grado de libertad de balance)

ϕ : Ángulo de rotación

B_{44a} : Coeficiente de amortiguamiento lineal

B_{44b} : Coeficiente de amortiguamiento cuadrático

C_{44} : Elemento recuperador

ξ : Coeficiente de amortiguamiento total

ω_0 : Frecuencia de oscilación

δ : Coeficiente de amortiguamiento dimensional

ω_n : Frecuencia natural del buque

Δ : Desplazamiento del buque

GM_0 : Altura metacéntrica en aguas tranquilas

GM_a : Diferencia entre altura metacéntrica máxima y mínima en un movimiento

ω_e : Frecuencia de encuentro

ω_n : Frecuencia natural del buque

ω_w : Frecuencia de olas

g: Constante de gravedad

u: Velocidad del buque

β : Ángulo de incidencia de olas

t: Tiempo

φ : Ángulo de función sinusoidal

p: Constante de la ecuación de Mathieu (eje x)

q: Constante de la ecuación de Mathieu (eje y)

k: Relación entre constante de amortiguamiento y frecuencia

GZ: Brazo adrizante

α : Ángulo para cambio de variable

S_w : Pendiente de ola

H: Altura de ola

λ : Longitud de ola

a_{44} : Valor en tablas de masa añadida (Coeficiente A_{44})

\overline{OG} : Distancia entre superficie de agua y centro de gravedad

a_{42} : Valor en tablas de masa añadida (Coeficiente A_{42})

a_{24} : Valor en tablas de masa añadida (Coeficiente A_{24})

a_{22} : Valor en tablas de masa añadida (Coeficiente A_{22})

P: Peso experiencia de estabilidad

d: Distancia experiencia de estabilidad

μ : Ángulo de escora en la experiencia de estabilidad

KG : Altura del centro de gravedad

KM: Distancia desde la quilla hasta el metacentro

K1: Valor lineal de la función de amortiguamiento

K2: Valor cuadrático de la función de amortiguamiento

1 INTRODUCCIÓN

Uno de los buques más característicos cuando se habla de este tema es el APL China, un portacontenedores post-Panamax de 276 metros de eslora y 66520 toneladas. Este buque hizo iniciar una preocupación que hasta el momento no era palpable, un fenómeno que se estudiaba en los laboratorios, pero que normalmente no tenía repercusiones en las embarcaciones que surcaban los mares antes del 1998. En este año, el buque sufrió un fenómeno conocido como resonancia paramétrica, fenómeno que desemboca en grandes ángulos de escora en un plazo corto de tiempo, pudiendo dañar la carga que puedan estar transportando en ese momento e incluso herir a los propios tripulantes del buque.

A partir de este momento era necesaria la intervención de sociedades de clasificación y órganos gubernamentales que trabajasen para realizar diversas recomendaciones y criterios para evitar que más buques tuviesen ese tipo de pérdidas (que en caso del APL China ascendían a 400 contenedores perdidos). Uno de los puntos importantes a solucionar era el conocimiento que tenían las tripulaciones sobre el fenómeno, ya que, en caso del APL China, no se sabía cómo proceder ante este problema.

La resonancia paramétrica es un fenómeno que se da lugar cuando el buque encuentra olas provenientes de popa o proa, con una frecuencia particular, cerca de dos veces la frecuencia natural del buque. Tanto sea por la velocidad del buque como por las características de la tormenta, cuando la ola tiene la altura suficiente y se produce esta recurrencia, el buque comienza a experimentar un movimiento de balance, produciéndose ángulos de escora a babor y estribor cada vez más grandes, lo cual genera los resultados anteriormente mencionados (daño de la carga, posible daño a los pasajeros o a los tripulantes, pérdida de bienes, como pueden ser muebles en un crucero...) o incluso con la pérdida del buque.

Este fenómeno de estabilidad dinámica se produce a la variación de brazos adrizantes con el paso de la ola a lo largo del buque, influyendo en menor medida el acoplamiento con los movimientos de cabeceo y arfada. Estos elementos, producidos por el paso de la ola a lo largo del buque produce en frecuencias determinadas un fenómeno de resonancia dinámica, como puede ocurrir en otros campos sometidos a fuerzas de este tipo.

Después del accidente, parecía imposible conseguir medidas para evitar el fenómeno. Sin embargo, unos años después se comenzaron a obtener sistemas que, basándose en los posibles fenómenos meteorológicos y la ruta dada, eran capaces de predecir dónde era más probable la generación de resonancia. El principal problema de estos sistemas era que no detectaban exactamente dónde ocurriría la resonancia, lo cual obligaba al buque a reducir la velocidad donde posiblemente no se produciría resonancia. Esto daba lugar a tiempos de flete mucho más largos, por lo que no era interesante para el negocio en sí.

Los sistemas fueron mejorando y se llegó a los sistemas de segunda generación. Estos sistemas podían detectar en tiempo real en que momentos podía ocurrir la resonancia paramétrica, pudiendo de esta manera tomar medidas correctivas a pocos minutos de que se produjese la posibilidad del fenómeno.

Las últimas publicaciones, datadas en los años 2016 y 2017, tratan sobre la predicción de resonancia paramétrica en un entorno de olas irregulares. Siendo la gran mayoría de análisis anteriores para mares de proa o popa con olas regulares, es interesante observar esta otra vertiente, ya que se tratan de los momentos más impredecibles, donde no se puede apreciar un claro caso de resonancia paramétrica, pero donde el fenómeno surge de la aleatoriedad de las olas irregulares [1], [2]

1.1 Objetivos del presente trabajo

Este trabajo pretende acercar al lector al fenómeno de resonancia paramétrica mediante la realización de experimentación real con modelos en un canal de experiencias y mediante la realización de dos modelos matemáticos que, con sus respectivas consideraciones, predecirán el movimiento de balance del buque. En cuanto a la metodología y el orden del trabajo, se desarrollará como sigue.

En primer lugar, se realizará un análisis del fenómeno en sí, viendo los buques que pueden ser afectados por el mismo y por qué es un fenómeno interesante e importante a tener en cuenta cuando se comienza con la construcción de un buque.

A continuación, se presentarán los casos a realizar de forma experimental. Primeramente se planteará un modelo matemático de un solo grado de libertad, pero contemplando los efectos dinámicos. Se mostrará la realización de dicho modelo y cómo obtenerlo. En segundo lugar, se realizarán ensayos en el canal de experiencias de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de A Coruña, en Ferrol, con el modelo de un arrastrero, el "MFV Trident", para ver cómo se comporta en mares específicamente generados para obtener el fenómeno deseado.

Se mostrará, además, la relación entre ambos modelos, viendo cómo el modelo matemático se acerca o aleja más a los resultados obtenidos del canal de ensayos.

Como trabajo adicional, se podrían considerar diversos modos y sistemas de evitar la resonancia paramétrica, tanto activos como pasivos. Una práctica posible sería ver cómo podría afectar los tanques antibalance al modelo anteriormente mencionado.

2 RESONANCIA PARAMÉTRICA

La resonancia paramétrica, como se ha dicho anteriormente, es un fenómeno indeseable que puede dañar carga o personas en una embarcación. Además del APL China, ha habido más casos de resonancia paramétrica en los últimos años, sin saber cuántos han sido juzgados de forma errónea en décadas anteriores (casos que hayan sido debido a resonancia paramétrica y se haya considerado debido a otro problema).

Además de estos buques afectados, existe una gran historia de experimentación detrás del fenómeno de resonancia paramétrica, y, de forma mucho más general, de los momentos de escora en los buques, que ha sido estudiada desde el siglo XIX.

En el presente capítulo se comentará de forma detallada toda la historia de la resonancia paramétrica, desde las primeras investigaciones hasta los diversos tipos de buques que han experimentado el fenómeno, viendo cuales son los detalles y características de los mismos que los han llevado a este comportamiento. También se comentará, de forma teórica, la realización de modelos matemáticos para reflejar este tipo de fenómeno.

2.1 Historia de la resonancia paramétrica

En el estudio más inicial de la estabilidad de un buque, éste se considera como un sólido rígido flotando libremente en una superficie. Este sólido rígido tiene seis grados de libertad (avance, movimiento lateral, arfada, cabeceo, balance y virada). Como en este sector muy bien se sabe, es el balance el grado de libertad en el que el buque tiene menos inercia, por lo que es en el que se producen los movimientos peligrosos. Grandes ángulos de escora pueden producir efectos variados, desde simple malestar para la tripulación o los pasajeros, hasta la pérdida total del buque por inundación.

En el caso de la resonancia paramétrica, fenómeno que afecta al balance, tan sólo tres de los grados de libertad afectan (arfada, cabeceo y balance). La excitación de estos movimientos de una manera determinada será lo que lleve al buque a entrar en un efecto dinámico indeseable, con las posibles pérdidas que anteriormente se han comentado. El fenómeno puede producirse sin la actuación del acople, simplemente con la variación en los brazos adrizantes.

La primera persona que observó y realizó diversos análisis sobre la resonancia paramétrica fue Froude, que, observando que cuando la frecuencia en cabeceo y arfada de una embarcación era dos veces su frecuencia natural en balance, se producían grandes ángulos de escora en muy poco tiempo, siendo éstos indeseados para la navegación normal de embarcaciones que se encontraban en ruta [3] [4].

Froude realizó ensayos en el 1870 gracias a su incorporación en el Comité de Diseño de Buques de Guerra en Gran Bretaña, ensayos en los que se incorporaban tanto buques a escala como buques de guerra que navegaban en esos momentos. Los ensayos realizados se enfocaban más hacia problemas de estabilidad básicos, por lo que no eran exactamente análisis del fenómeno descrito [5].

Froude implementó quillas de balance para intentar reducir el balance del buque, el comportamiento que tenía éste a las excitaciones laterales. Pero, al observar la diferencia entre los momentos generados en el laboratorio y los que se encontraba en el buque en cuestión, se determinó en el Comité que era de buena práctica la utilización de tanques antibalance. Como resultado, se incorporaron en el buque cámaras de agua para mejorar la estabilidad, reportes obtenidos de Phillip Watts [5].

Como se comentaba al inicio de este capítulo, Froude observó que el buque entraba en un tipo de resonancia cuando generaba que la frecuencia del cabeceo no amortiguada fuese dos veces la frecuencia del balance. Este fenómeno ocurría por el acople entre ambos grados de libertad, que daba lugar a la resonancia autparamétrica de balance.

Los siguientes indicios de la investigación de resonancia paramétrica se encuentran en los años 50, donde investigadores como Kerwin o Paulling llevan a cabo experimentaciones sobre el tema. Sin embargo, siempre se había pensado como un tema de interés teórico, sin implicaciones reales en el transporte marítimo. En años posteriores, cerca de la finalización del siglo, se siguieron realizando a cabo investigaciones (Sanchez y Nayfeh, Umeda et al, Hamamoto...referenciadas en textos como [5] [6]) e incluso órganos de seguridad marítima (IMO) [7]

Es en el 1998, con el accidente del APL China, y en el 2003, con el Maersk Carolina, cuando se empieza a tomar consciencia del problema de forma real. Diversas sociedades de clasificación entran en la investigación de la problemática y del desarrollo de sistemas para indicar la posibilidad de resonancia para que la tripulación de un buque pueda tomar medidas al respecto. La sociedad americana ABS, en el 2004, publica una guía para el diseño de portacontenedores que sean menos susceptibles al fenómeno [5], [7]. La gran mayoría de sociedades de clasificación, además de ABS, trabajan incluso hoy en día para desarrollar sistemas de predicción de resonancia [8].

Knut Døhile, el vicepresidente de DNV GL, realizó una publicación en 2006 "*Parametric Rolling – a problem solved?*" donde trataba todas las problemáticas referentes a este fenómeno. Uno de los análisis que realizaba era sobre cómo se podían modificar las rutas y estrategias de navegación de los diversos buques clasificados por DNV GL para minimizar la posibilidad de la resonancia. Éste planteamiento dejaba atrás todos los sistemas que modificaban las condiciones en una ruta dada, ya que, a veces, la única manera de ir hacia un destino es con condiciones desfavorables [8].

A pesar de que la publicación se centraba en asegurar la seguridad de los pasajeros y de las personas que hay a bordo, también hablaba sobre el impacto en consumo de combustible tenía la estrategia de cambio de ruta. Por ello, era muy necesaria la implementación de sistemas que calculasen en tiempo real las posibilidades de encontrarse con condiciones de mar problemáticas para que se generase la resonancia [8].

Sin embargo, para comenzar a realizar diseños para evadir la posibilidad de la resonancia paramétrica, es necesario comprender de manera más exhaustiva el fenómeno. En su momento, se realizaron análisis para comparar el amortiguamiento teórico del balance

con los medidos en un movimiento forzado en el canal. Posteriormente, se realizaron análisis con el modelo en aguas libres, con todos los parámetros necesarios para la excitación resonante, para comparar datos numéricos.

En cuanto a los modelos matemáticos, se han llevado a cabo diversos análisis, desde modelos del buque de un grado de libertad, hasta modelos completos, de más de 3 grados de libertad. Las publicaciones actuales se centran en cómo afectan el cambio de parámetros en tiempo real en un mar de tipo irregular que genera el fenómeno de resonancia paramétrica[9]

Como se pueden observar en los análisis de este fenómeno, primeramente se lleva a cabo el desarrollo de un modelo matemático para el estudio del mismo. Por ello, se describirá de forma básica la naturaleza de la resonancia paramétrica de forma matemática, para comprender de una manera más técnica el fenómeno.

2.2 Modelado matemático de la resonancia paramétrica en buques (modelo simplificado)

La resonancia en buques fue descrita primeramente por Froude en su estudio de balance de buques ("On the rolling of ships" [10]) Cuando la frecuencia de encuentro de las olas entra en resonancia con el balance del buque, se generan amplitudes cada vez mayores (como puede pasar en cualquier sistema dinámico, la amplitud tendería a infinito si no existe amortiguamiento). Este fenómeno se consideraba un problema, las olas de costado podían llegar a voltear el buque si entraban en resonancia.

Sin embargo, la resonancia paramétrica se diferencia principalmente de la resonancia por la dirección de las olas. A pesar de que parezca contraintuitivo, se genera resonancia paramétrica cuando las olas se encuentran con el buque principalmente por proa o por popa (no de costado, como pasaba con la resonancia). Como se ha comentado anteriormente, las olas no tienen que ser necesariamente olas regulares que se encuentren con el buque por proa o por popa, si no que pueden existir mares irregulares donde se produzca la resonancia de este tipo.

Las condiciones que se han de cumplir para que sea muy probable la generación de resonancia paramétrica son las siguientes [5] [4] [8] [11] [12]:

- La frecuencia de encuentro de las olas ha de ser cerca del doble de la frecuencia natural de balance del buque
- Las olas han de tener aproximadamente una longitud de onda igual a la del buque
- La altura de la ola ha de ser significativa para que se produzca el fenómeno
- El amortiguamiento del balance del buque ha de ser pequeño

El fenómeno se produce en buques que tienen unas formas específicas. Cuando las formas de proa y popa son muy finas, con un gran abanico (las formas se ensanchan

rápidamente a medida que se sube en puntal) hacen que el área de flotación cambie drásticamente cuando pasa la ola. Esto provoca un grandísimo cambio en las características de recuperación en grandes ángulos a balance (GZ). Si esta variación se produce a la frecuencia descrita, el brazo adrizante hará que el buque recupere su estabilidad justo cuando la ola empuje al buque a escorar hacia el lado contrario. De esta manera, el momento de recuperación, en vez de adrizar el barco, ayudará a aumentar la excitación, produciéndose una amplitud mayor que en la oscilación anterior.

En este momento, el fenómeno no dejará de producirse hasta que las condiciones desaparezcan, el barco vuelque o el amortiguamiento debido al balance limite la escora. Las condiciones son diversas para cada tipo de buque, pero el fenómeno es incontrolado y puede dar lugar a situaciones muy peligrosas, como se comentaba al inicio del documento.

Se puede deducir de esta descripción que los buques más afectados son los que varían sus formas en gran medida en las partes de proa o popa, como pueden ser los portacontenedores, ro-ros y pesqueros determinados. El paso de la ola varía de forma notable la flotación del mismo. Esto, junto a la variación de los brazos adrizantes provoca el peligro. Este fenómeno no se producía antes de la llegada de los grandes buques mercantes, ya que no tenían un diseño tan propenso a provocar la resonancia.

Para comprender mejor el cambio de en el área de flotación, se ha realizado un pequeño estudio con un pesquero de pequeña eslora que cumple los requisitos anteriores.

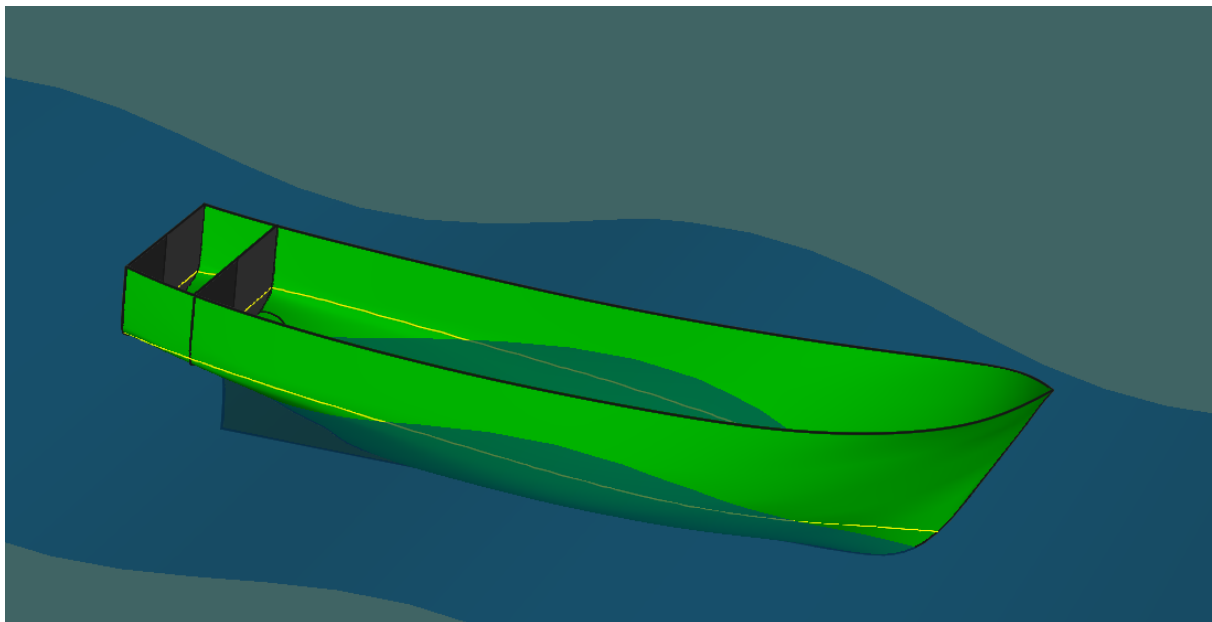


Figura 2.1 Modelo de pesquero sometido a ola sinusoidal

Si se realiza un análisis a grandes ángulos desfasando la ola para que tenga la cresta en popa o en el centro del buque, se puede observar que existe una gran variación del brazo adrizante, variación que generará resonancia paramétrica en caso de que se produzca a la frecuencia adecuada. También se puede observar una gráfica de cómo varían las áreas de flotación a medida que pasa el buque:

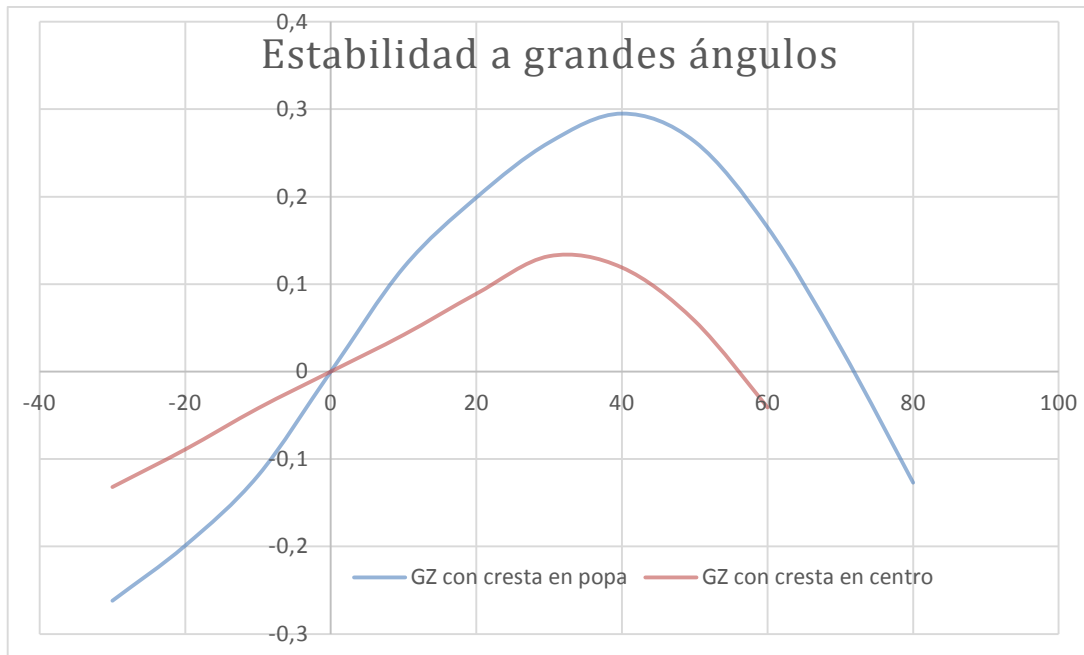


Figura 2.3 Resultado de análisis de estabilidad a grandes ángulos

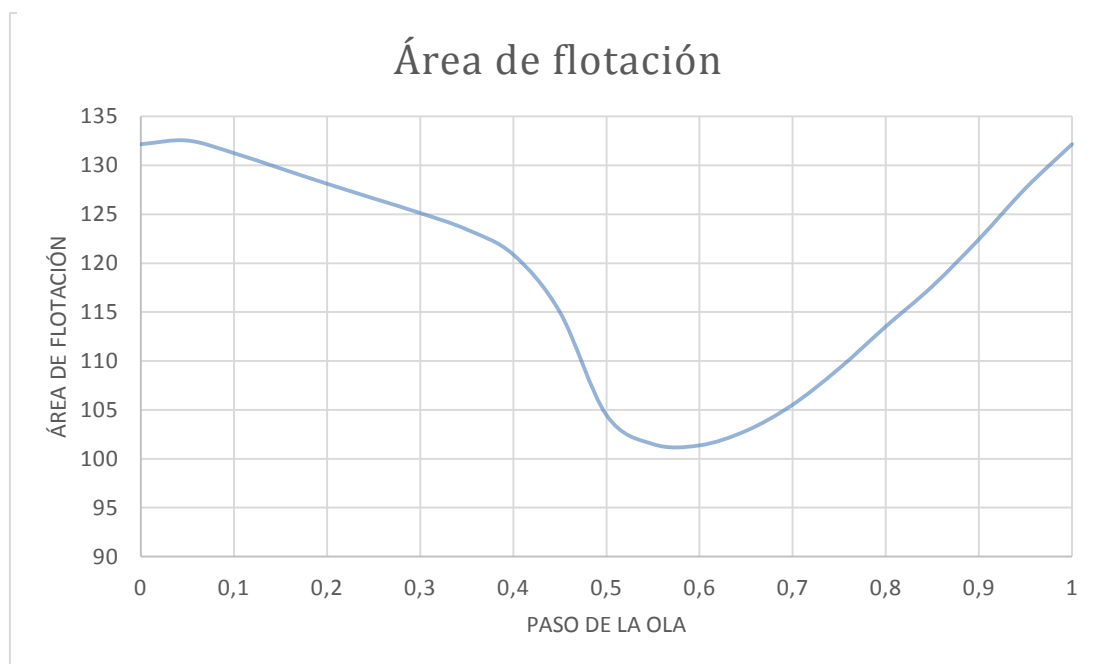


Figura 2.2: Área de flotación con el paso de la ola

Al inicio, en los años 50, el estudio de la resonancia paramétrica se limitaba a análisis de tipo matemático, en la gran mayoría de los casos ni siquiera se realizaban experiencias en un canal. Todo pertenecía parte al análisis del comportamiento de los buques en la mar, con todos los fenómenos que ello conllevaba, y se limitaba a una aproximación de las ecuaciones de Navier-Stokes [5].

Mediante simplificaciones del sistema, se obtuvieron los RAOs correspondientes a las respuestas que el buque ofrece al ser excitado por una ola regular de amplitud y frecuencia dadas. Posteriormente se desarrollaron teorías para obtener estos RAOs en determinadas condiciones. Una de las más importantes sería la teoría de las rebanadas, capaz de hacer obtener los coeficientes hidrodinámicos de un buque mediante la simplificación del mismo en un semicilindro cortado en diversas secciones.

Para comenzar a plantear un modelo matemático, primero hemos de realizar varias simplificaciones para evitar términos indeseados. Entre estas simplificaciones, se encuentran la consideración de flujo irrotacional y el hecho de considerar que el fluido será de tipo Newtoniano.

A partir de estas asunciones, se puede comenzar a plantear el modelo matemático. Se quieren estudiar los efectos dinámicos del buque en unas condiciones determinadas, por lo que, si se considera un modelo simplificado (que se considera preciso para la gran mayoría de los casos), se trataría de un modelo masa-muelle-amortiguador de seis grados de libertad, con un eje de coordenadas centrado en el buque OXYZ, donde el eje X sería el que sigue el plano de crujía, el eje Y sería el transversal paralelo a la superficie del mar y el eje Z sería el que sigue al puntal del buque.

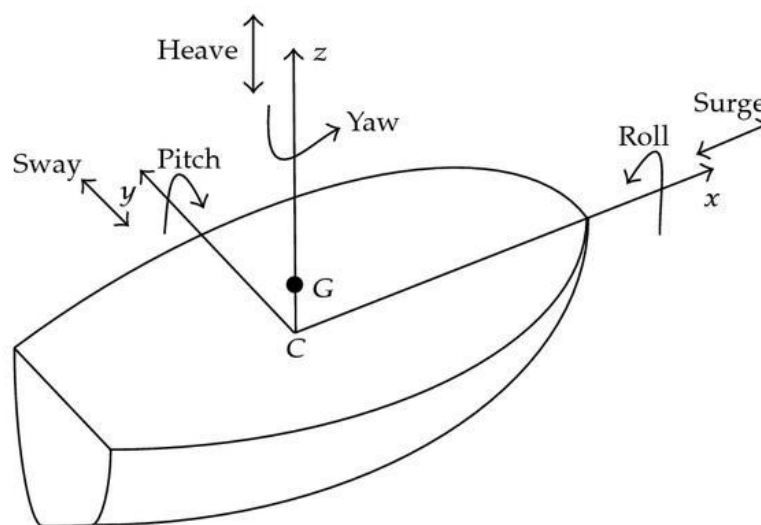


Figura 2.4 Grados de libertad de un buque

Fuente: <https://www.hindawi.com> [En línea], *Ciencia y tecnología de buques*, Vol 5, Nº 10

El comportamiento del buque en estas condiciones se limita, por lo tanto, a reflejar los 6 grados de libertad en un conjunto de matrices que responda la estructura masa-muelle-amortiguador, que es la siguiente:

$$[M + A] \cdot \ddot{\vec{s}} + [B] \cdot \dot{\vec{s}} + [C] \cdot \vec{s} = \vec{F}_{ext} \quad [1]$$

Los términos reflejados en la ecuación anteriormente descrita son los siguientes:

- M corresponde a la matriz de masas generalizadas
- A corresponde a la masa hidrodinámica añadida de agua que acompaña al sólido
- B representa la matriz de amortiguamiento
- C es la matriz de coeficientes de recuperación
- F_{ext} representa las excitaciones externas de los grados de libertad (fuerzas y momentos)

Esta ecuación dará lugar al sistema de ecuaciones que responde al movimiento del buque. Cada una de las matrices se puede componer como sigue

El término de la matriz de masas se trata de la fuerza de inercia derivada de la ley de Newton. Considerando el eje anteriormente explicado y simetría lateral (el buque es igual a estribor que a babor), se consigue una matriz prácticamente diagonal con unos términos de inercia debido a la no simetría de proa con popa:

$$[M] = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{xx} & 0 & -I_{zx} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_{xz} & 0 & I_{zz} \end{pmatrix}$$

El término de masa añadida es un término existente debido a la cantidad de agua que se arrastra con el avance del sólido. Ha de ser considerado en la amplia mayoría de fenómenos dinámicos que ocurren en fluidos con densidades a considerar (sin poder ser despreciables). Si se considera, como anteriormente, que existe simetría entre estribor y babor, tan sólo se eliminarían algunos de los términos de la matriz, quedando como sigue:

$$[A] = \begin{pmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} & 0 & A_{15} & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & A_{24} & 0 & A_{26} \\ A_{31} & 0 & A_{33} & 0 & A_{35} & 0 \\ 0 & A_{42} & 0 & A_{44} & 0 & A_{46} \\ A_{51} & 0 & A_{53} & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & A_{62} & 0 & A_{64} & 0 & A_{66} \end{pmatrix}$$

La matriz de coeficientes de amortiguamiento mantendrá una estructura muy similar a la anterior. Se trata de todos los coeficientes de amortiguamiento del buque, que intentan reducir el movimiento en los diversos grados de libertad. La matriz sería:

$$[B] = \begin{pmatrix} B_{11} & 0 & B_{13} & 0 & B_{15} & 0 \\ 0 & B_{22} & 0 & B_{24} & 0 & B_{26} \\ B_{31} & 0 & B_{33} & 0 & B_{35} & 0 \\ 0 & B_{42} & 0 & B_{44} & 0 & B_{46} \\ B_{51} & 0 & B_{53} & 0 & B_{55} & 0 \\ 0 & B_{62} & 0 & B_{64} & 0 & B_{66} \end{pmatrix}$$

En cuanto al término [C], es la matriz que corresponde a las fuerzas de adrizado del buque, que se oponen a la escora y la modificación de la orientación. Los desplazamientos en el eje X y el eje Y no tienen fuerzas de oposición que sean de este tipo, por lo que los términos en la matriz correspondientes a avance y movimiento lateral serán igual a 0. Considerando simetría en el plano de crujía, se pueden anular coeficientes de acoplamiento entre los grados de libertad (como pueden ser los momentos verticales) y coeficientes prácticamente nulos, que hacen que la matriz sea:

$$[C] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & 0 & C_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{53} & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & C_{62} & 0 & C_{64} & 0 & C_{66} \end{pmatrix}$$

Definiendo estas matrices, se obtiene un modelo matemático de los movimientos del buque que se rige por la segunda ley de Newton. Muchos de los textos de referencia comienzan con la definición de este simple modelo matemático que responde a cómo se mueve el buque[5][7][13], o acercándose al problema de forma similar[2].

Quedaría por definir las excitaciones externas de los grados de libertad, que, como cabe de esperar, son la resultante de la ecuación:

$$[F_{\text{ext}}] = \begin{pmatrix} F_{ox} \\ F_{oy} \\ F_{oz} \\ M_{ox} \\ M_{oy} \\ M_{oz} \end{pmatrix}$$

Esta definición de las diversas matrices con sus elementos por grado de libertad contempla los seis grados de libertad. Se podrían generar seis ecuaciones diferenciales de segundo orden que contemplen todos los posibles movimientos del buque con sus acoples. Normalmente no se contempla un modelo de seis grados de libertad, ya que existen grados de libertad que no contribuyen al fenómeno de resonancia paramétrica.

Los grados de libertad considerados para la resonancia paramétrica son, como se había considerado al principio, afada, balance del buque y cabeceo. También se podrían considerar posibles acoples entre los diversos grados, aunque se consideran despreciables. Textos como [9], [13] consideran modelos complejos de tres grados de libertad para su posible utilización en sistemas de predicción de resonancia paramétrica en tiempo real [8]. También existen análisis de dos grados, donde se consideran el desplazamiento vertical y el balance [14].

Sin embargo, otros muchos textos, como [13][5], utilizan modelos que tan sólo contemplan un grado de libertad, el grado de balance, para obtener los resultados referentes a la resonancia. Estos modelos han probado tener exactitud suficiente como para poder ser considerados sin una gran incertidumbre. Aun así, para los modelos de un solo grado de libertad se suelen considerar parámetros del buque cambiantes, aspectos que cambian al modificarse otros grados de libertad, por lo que no se desprecian totalmente [12].

El presente documento utilizará diversas consideraciones para introducir parámetros del buque que cambian a medida que pasa la ola, consiguiendo un modelo de 1,5 grados de libertad. Este modelo contemplará el grado de libertad de balance del buque, introduciendo de forma cuasiestática las variaciones debidas al cabeceo y la arfada (valores de GM o GZ). De forma general, y, sin tener en cuenta estos parámetros, el modelo de un grado de libertad quedaría:

$$(I_{xx} + A_{44}) \cdot \ddot{\phi} + (B_{44a} + B_{44b} \cdot \dot{\phi}) \cdot \dot{\phi} + C_{44} \cdot \phi = M_{ox} \quad [2]$$

Al estar estudiando el fenómeno de resonancia paramétrica, el mar que más desfavorece y que por lo tanto es el óptimo para el estudio es el que hace que las olas se encuentren con el buque por proa o por popa. Esto implica que no existirá ningún momento excitante externo debido al oleaje, lo cual anula los momentos externos en la expresión anterior [5]:

$$(I_{xx} + A_{44}) \cdot \ddot{\phi} + (B_{44a} + B_{44b} \cdot \dot{\phi}) \cdot \dot{\phi} + C_{44} \cdot \phi = 0 \quad [3]$$

El coeficiente de amortiguamiento se ha dividido en dos, siendo el primero el que corresponde al coeficiente de primer orden, y el segundo el que corresponde al coeficiente de segundo orden. El primero de los coeficientes de amortiguamiento es el coeficiente lineal. El segundo coeficiente es un coeficiente cuadrático, por lo tanto, no lineal, que se introduce debido a la consideración de grandes ángulos. Este valor indicará un aumento exponencial en el amortiguamiento a medida que se aumenta el movimiento [13].

Si se realizase una analogía de la ecuación de balance del buque anteriormente descrita con una oscilación armónica, se podría obtener una expresión que describiese el fenómeno de resonancia paramétrica. Si se considera, como anteriormente, un mar de proa sin excitaciones externas transversales, se obtiene lo siguiente [5], [15], [16]:

$$\ddot{\phi} + 2\xi\omega_0\dot{\phi} + \omega_0^2\phi = 0 \quad [4]$$

, donde los términos incurridos en la ecuación son los siguientes:

- ξ es el coeficiente de amortiguamiento
- ω_0 es la frecuencia de oscilación (que se considerará la de resonancia)
- ϕ es el ángulo de rotación del buque

Considerando que la frecuencia que se indica es la de resonancia y que $\xi \cdot \omega_0$ se puede expresar como un término de amortiguamiento dimensional (δ), la ecuación se puede expresar de la siguiente forma:

$$\ddot{\phi} + 2\delta\dot{\phi} + \omega_n^2\phi = 0 \quad [5]$$

De forma general, la frecuencia natural de un buque, para pequeños ángulos, se puede igualar a la siguiente relación:

$$\omega_n^2 = \frac{\Delta \cdot GM_0}{(I_{xx} + A_{44})} \quad [6]$$

, donde Δ es el desplazamiento del buque, GM_0 es la altura metacéntrica media en un movimiento, I_{xx} es la inercia en ese grado de libertad (balance) y A_{44} es la inercia añadida debido a la porción de líquido que se mueve solidariamente con el sólido.

De esta manera, las variables que se encuentran en la ecuación correspondiente al movimiento del buque se corresponden a:

$$B_{44} = 2 \cdot \delta \cdot (I_{xx} + A_{44}) \quad [7]$$

$$C_{44} = \Delta \cdot GM_0 \quad [8]$$

Se ha de tener en cuenta las dos consideraciones en las que se han incurrido en las ecuaciones anteriores. La primera sería la utilización de la altura metacéntrica en aguas tranquilas, mientras que la segunda sería la propia utilización de altura metacéntrica, valor que sólo se ha de considerar para pequeños ángulos.

La altura metacéntrica ha de ser corregida un valor que depende de la ola a considerar. Al pasar la ola proveniente de proa, la geometría del casco sumergida cambiará, lo cual hará cambiar el centro de carena y el radio metacentro. Por ello, el metacentro variará de posición y por consiguiente la altura metacéntrica. Este valor cambiará a medida que pase la ola, por lo que tendrá valores mayores en algunos casos y menos en otros. Considerando un movimiento sinusoidal, el valor de altura metacéntrica [4], [14]:

$$GM(t) = GM_0 + GM_a \cdot \cos(\omega_e t) \quad [9]$$

La variable que se encuentra en la función sinusoidal sería la frecuencia de encuentro, frecuencia a la que el buque percibiría las olas. Esta frecuencia de encuentro viene dada por la velocidad del buque, la frecuencia de las olas y la dirección de la misma con la siguiente relación[5]:

$$\omega_e = \omega_w - \frac{\omega_w^2}{g} \cdot u \cdot \cos(\beta) \quad [10]$$

Al tratarse de un mar donde las olas tan sólo inciden por proa o por popa, el valor del coseno será siempre máximo o mínimo (alternará entre 1 y -1)

En cuanto a la consideración de pequeños ángulos o grandes ángulos, se realizarán análisis con ambas suposiciones, por lo que se considerará acertado por el momento. Más adelante se realizará el análisis a grandes ángulos.

Volviendo a la ecuación que refleja el fenómeno de resonancia paramétrica, si se sustituyen las igualdades obtenidas, la relación queda:

$$\ddot{\phi} + 2\delta\dot{\phi} + \frac{\Delta \cdot (GM_0 + GM_a \cdot \cos(\omega_e t))}{(I_{xx} + A_{44})} \phi = 0 \quad [11]$$

$$\ddot{\phi} + 2\delta\dot{\phi} + \frac{\Delta \cdot GM_0}{(I_{xx} + A_{44})} \cdot \left(1 + \frac{GM_a}{GM_0} \cdot \cos(\omega_e t)\right) \phi = 0 \quad [12]$$

Esta expresión es útil para extraer conclusiones sobre el fenómeno de resonancia paramétrica. Si consideramos que el movimiento no se amortigua en absoluto, y que $\omega_e t$ se puede igualar a una variable (también varía la derivada segunda con este cambio), la ecuación queda:

$$\frac{d^2\phi}{d\varphi^2} + \frac{\omega_n^2}{\omega_e^2} \cdot \left(1 + \frac{GM_a}{GM_0} \cdot \cos \varphi\right) \phi = 0 \quad [13]$$

Si ahora igualamos la relación entre frecuencias por una variable “p”, y la relación entre alturas metacéntricas y frecuencias por una variable “q”, la ecuación responde al modelo de la función de Mathieu, utilizada en muchos textos para estudiar el fenómeno [1]. La función de Mathieu identifica zonas de estabilidad e inestabilidad dependiendo de la relación que existe entre las frecuencias, obteniendo así valores umbrales donde sería posible la inestabilidad del buque.

$$\ddot{\phi} + (p + q \cos \varphi) \phi = 0 \quad [14]$$

Si se introdujese el término de amortiguamiento en esta simplificación, sería un factor a sustraer en la parte de la relación de las frecuencias natural y de encuentro [5].

$$k = \frac{\delta}{\omega_e} \quad [15]$$

$$p = \frac{\omega_n^2}{\omega_e^2} - k^2 \quad [16]$$

A continuación se puede observar la función de Mathieu aplicada a la gráfica de estabilidad de Ince-Strutt, que contempla la función amortiguada, con la anotación anteriormente citada [17]:

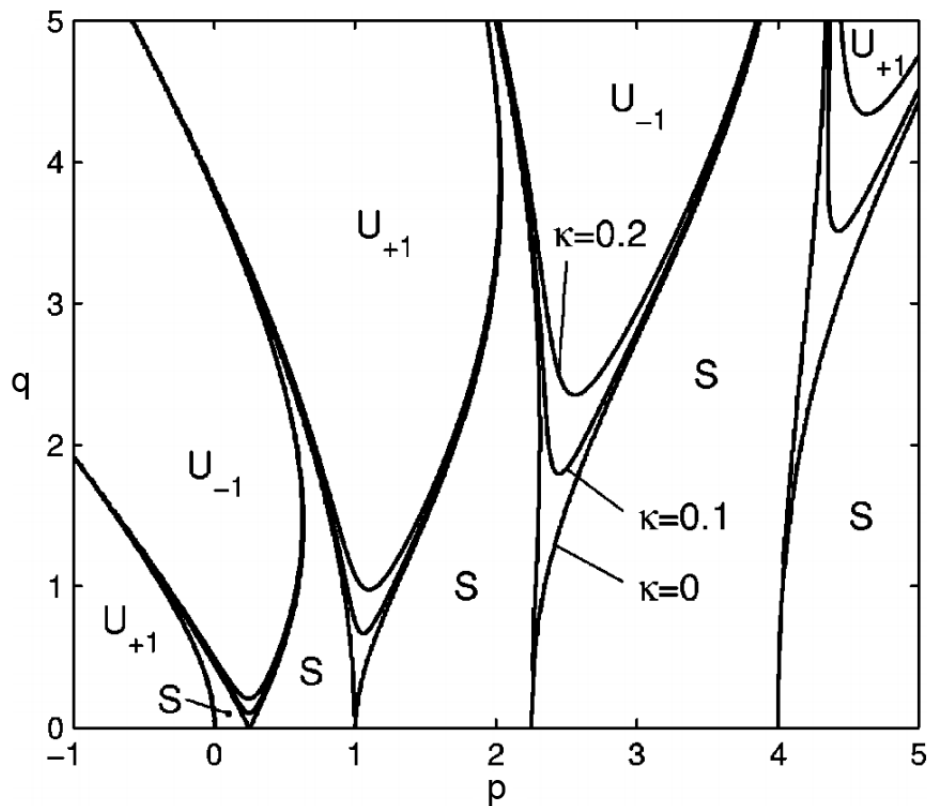


Figura 2.5 Gráfica de estabilidad de Strutt-Ince sobre la ecuación amortiguada de Mathieu

Fuente: Stability of the Damped Mathieu Equation With Time Delay, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control[17]

Las zonas delimitadas por las curvas superiores serían las zonas de inestabilidad (U), mientras que las zonas inferiores serían las zonas estables. Como se comentó al inicio del trabajo, la resonancia paramétrica se produce cuando la relación entre frecuencia natural y frecuencia de encuentro llega a un determinado valor (ω_e es 2 veces ω_n). Si consideramos la relación que existe en la ecuación, esto quiere decir que p tendría que ser 0,25.

En la gráfica anterior (Figura 2.5) se observa sin problema que el valor 0,25 de la relación entre frecuencias es conflictivo, ya que sería la intersección de una zona inestable. Cabe destacar que los valores negativos no son posibles, por lo que la zona que se encuentra detrás del cero (y los valores de las zonas posteriores que pasen de cero) no son considerados.

Para el valor q , esta relación tiene que ver con la variación entre alturas metacéntricas y el valor de p . Cuanto mayor sea el valor de GM_a , variación de altura metacéntrica con respecto a la altura metacéntrica en aguas tranquilas, más se adentrará el valor en la zona de inestabilidad. Hay que recordar que el valor que toma la variación de alturas metacéntricas depende principalmente de las características de la ola y de las formas del buque.

Por ello, cuanto más haga variar la ola el área de flotación (determinado, como se ha comentado anteriormente, por la altura de ola y las formas del buque) mucho más inestable será el fenómeno.

Nótese que el valor del coeficiente de amortiguamiento va directamente restando a la relación entre frecuencias. Este valor es dependiente de la frecuencia de encuentro y del valor de $\bar{\delta}$, que varía a medida que se va desarrollando la resonancia paramétrica. Este valor es el que consigue reducir la relación entre frecuencias y hace que cese el fenómeno en los casos en los que se genera de forma descontrolada. Es posible introducir sistemas que aumenten este valor, como pueden ser quillas de balance.

A pesar de que no se pueda de forma manual cambiar el valor del amortiguamiento, si se puede intentar modificar la relación entre frecuencias. Las relaciones anteriores hablan sobre orientación de las olas y frecuencia de encuentro. La variación de dirección cambiaría la incidencia de las olas, que ya no serían por proa o por popa, resultando en una variación de la frecuencia de encuentro. Por otra parte, reducir la velocidad haría que las olas se retrasasen o adelantasen en el encuentro, por lo que también la variaría.

Sin embargo, para obtener un modelo que se acerque más a la realidad, habrá que obviar algunas de las simplificaciones que se tuvieron en cuenta anteriormente, como es la limitación a pequeños ángulos, o la consideración de pequeños movimientos.

2.3 Modelación matemática de la resonancia paramétrica en buques (modelo no lineal)

La consideración de pequeños ángulos ayuda a que el cálculo sea más simplificado. El término GM utilizado para el cálculo de C_{44} , el término de restauración, es relativamente sencillo, ya que depende de unos valores establecidos para el buque y las características de la ola (frecuencia de encuentro y posición de la cresta de la ola). Sin embargo, el valor de GZ depende del propio ángulo de escora (valor que se obtiene al resolver la ecuación diferencial de segundo orden anteriormente calculada), ya que el brazo adrizante depende principalmente del ángulo. Por ello, complica en gran medida el cálculo.

$$(I_{xx} + A_{44}) \cdot \ddot{\phi} + (B_{44a} + B_{44b} \cdot \dot{\phi}) \cdot \dot{\phi} + \Delta \cdot GZ(\phi, t) \cdot \phi = 0 \quad [17]$$

Con esta formulación, el modelo matemático representa de forma más exacta lo que sucede en la realidad, ya que los ángulos de escora cuando se produce el fenómeno son demasiado grandes como para considerar la simplificación de pequeños ángulos. De todas

formas, se realizará el análisis con el modelo matemático simplificado para obtener un muestreo mayor y reflexionar sobre la posible simplicidad del cálculo.

Se seguirá considerando que el amortiguamiento es no lineal, ya que, al entrar en grandes ángulos, los fenómenos viscosos hacen que el valor de amortiguamiento aumente de forma exponencial. La gran mayoría de los autores de investigaciones relacionadas con el tema suelen realizar simplificaciones restringidas a la consideración de pequeños ángulos (como podrían ser los textos de [1][16][18]) Entre ellos se pueden encontrar las recomendaciones del ITTC en cuanto a la resonancia paramétrica (para una aproximación sencilla se podrían utilizar tan sólo los términos de altura metacéntrica)

En cuanto a otros textos, como [12], se puede encontrar una aproximación al valor del elemento recuperador dependiente del brazo adrizante con un polinomio de grado 9, aunque el texto en sí mismo reconoce que esta aproximación sólo sería útil en los casos en los que se estén dando ángulos que estén muy cerca del vuelco del buque.

Otra de las simplificaciones realizadas en el modelo más simplificado es el desacople entre los diversos grados de libertad. Si se consideran grandes ángulos para los movimientos en el buque, todos los grados de libertad se excitarán de manera más acusada. De esta manera, los posibles acoples existentes entre los grados de libertad (como podrá ser cabeceo con escora) tendrán mucha más relevancia que en el análisis anterior. Como ya se ha comentado anteriormente, los grados de libertad más relevantes que puedan estar acoplados con el balance son el cabeceo y las subidas/bajadas.

Muchas de las referencias mencionadas en el texto consideran más de un grado de libertad, como pueden ser [2][19] [14]. Sin embargo, también hay textos que se centran en un solo grado de libertad, o, de forma algo más exacta, en un grado y medio (textos como [12] y [13])

A pesar de que los modelos que contemplan más grados de libertad pueden dar lugar a datos mucho más exactos, normalmente no suelen ser significativos. Algunos de los textos revisados realizan modelos sencillos por la poca practicidad de los modelos más complejos [5][6]. Por ello, en este trabajo se realizará el análisis con un modelo matemático que contemple 1,5 grados de libertad, introduciendo los valores de estabilidad de forma cuasiestática.

2.4 Tipos de buques susceptibles y antecedentes

Como se ha comentado en los apartados anteriores, el fenómeno ha sucedido en varias ocasiones con diferentes tipos de buques. Ha de notarse que el fenómeno no se genera de forma clara, ya que muchas de las excitaciones en la mar pueden dar lugar a ángulos de escora altos. La resonancia paramétrica podría confundirse fácilmente con una tormenta en la que se suceden olas que abaten de costado y escoran el buque. Por ello, es muy posible que, a los casos que se muestren a continuación, se le puedan añadir otros en los que se ha sucedido el fenómeno pero no se ha conseguido determinar.

Como primer ejemplo se podría destacar, como se comenzó el documento, con el APL China. Este buque se trata de un Post-Panamax de 4800 TEU, con 64700 toneladas de peso muerto y 262 metros de eslora. Cuando se desarrolló el fenómeno, el buque se encontraba en la ruta Taiwan-Seattle, donde fue abatido por el tifón Babs[5]. Los ángulos de escora producidos fueron demasiado grandes, incluso para una tormenta de ese estilo. Se llegaron a registrar ángulos de hasta 35 grados, lo cual acabó por dañar gran parte de la carga que transportaba en esos momentos.

De los 1300 contenedores que transportaba en el momento del accidente, 400 fueron perdidos y 500 dañados de forma severa, por lo que los bienes en su interior quedaron inservibles. Esto supuso un gran coste al fletador, reportándose un total de 100 millones de dólares en pérdidas. El accidente supuso una gran pérdida y fue clasificado como uno de los peores en la industria del transporte de bienes por medio marítimo[20].

Este accidente fue propiciado por dos factores principales. El primero de ellos fue que, en el diseño del buque, no se tuvo en consideración la resonancia paramétrica, práctica normal en esta época. El segundo fue el desconocimiento de actuación. El personal del barco no había sido formado ni sabía cómo enfrentarse a este fenómeno.



Figura 2.6 Daños del APL China “www.cojeen.com” [En línea, 13 de Noviembre de 2017]

Un segundo caso de accidente de resonancia paramétrica en portacontenedores sucedió en 2003 con el Maersk Carolina, muy similar al APL China. En este caso, el Maersk Carolina es un portacontenedores Panamax con capacidad para 4300 TEU y 292 metros de eslora.

El buque, en su viaje desde Algeciras hasta Halifax, encontró mal tiempo, con alturas de ola y velocidades de viento altas. Intentando que las olas se encontrasen con el buque de proa, el buque comenzó a escorarse de forma severa, con un desarrollo de altas amplitudes en muy poco tiempo. Se registraron ángulos de escora de hasta 47 grados, con un gran balance y cabeceo [5].

La narración de los eventos encaja perfectamente con el fenómeno de resonancia paramétrica, teorizándose que, al intentar que las olas fuesen de proa, se encontraron con una frecuencia de llegada que producía el fenómeno dinámico. Las pérdidas fueron de 133 contenedores perdidos y más de 50 contenedores dañados, a lo que le hay que añadir los daños estructurales de la embarcación que fueron posteriormente reparados [5].



Figura 2.7 Maersk Carolina en terminal de desembarco “<https://www.fleetmon.com> “[En línea, 15 de Noviembre de 2017]

Posteriormente a estos se han reportado diversos casos de resonancia paramétrica en buques del mismo tipo, como el Nedlloyd Genoa en 2006 o el CMA CGM el mismo año[5].

Uno de los casos posiblemente más interesantes es el del Svendborg Maersk. Este buque tiene una eslora de 347 metros, lo que lo hace uno de los buques más grandes en el que se ha reportado un problema de resonancia paramétrica. Otro de los datos interesantes a tener en cuenta es que se han construido un total de 16 buques iguales a este, por lo que podrá generarse un fenómeno de este tipo en todos ellos. Por último, el accidente se reportó en 2014, año en el que ya se habían realizado una gran cantidad de análisis sobre el fenómeno y existen sistemas de predicción del mismo [21].

El Svendborg Maersk se trata de un buque construido en 1998, con un total de 110387 toneladas de peso muerto y una eslora de 347 metros. El buque fue reconvertido en 2012 para poder alojar una mayor cantidad de contenedores en las alturas superiores. Estas

modificaciones, además de la clasificación del buque, corrieron a cargo de la sociedad de clasificación *American Bureau of Shipping*, aprobando todas las medidas de construcción del buque y su reconversión unos años más tarde [21].



Figura 2.8 Buque Svendborg Maerks "<http://www.shipspotting.com>" [En línea, 22 de noviembre de 2017]

El día 13 de Febrero de 2014 el buque se encontraba en la terminal de Rotterdam, donde realizaba sus labores de carga y descarga. Cuando se cumplieron todas las tareas, el buque se dispuso a abandonar el puerto y realizar su travesía. Debía de llegar al canal de Suez el día 20 de Febrero, por lo que se requería una velocidad 19,8 nudos de media.

Un poco antes de realizar la salida del puerto, se consultaron las condiciones meteorológicas que se podrían encontrar los tripulantes en el viaje. Existía una alta probabilidad de tormenta, pero los tripulantes estaban entrenados para trabajar en condiciones adversas en la mar. Se hizo un chequeo visual de las trincas de los contenedores para asegurar que todas estaban en buen estado y amarradas.

Al día siguiente, el día 14 de Febrero, sobre las 14:20 horas del día, las condiciones meteorológicas comenzaron a empeorar, hecho que ya se había predicho y que se había considerado de una relevancia moderada. El segundo oficial y el capitán del buque se encontraban en el puente de mando. Para combatir el mal tiempo, se redujo la velocidad a unos 10 nudos y se cambió el curso una pequeña cantidad para que las olas se encontrasen al buque de popa y se redujese al máximo la posibilidad de escora.

Una hora más tarde, una llamada de peligro por tormenta se registró en el sistema, indicando que las condiciones meteorológicas empeorarían. La tormenta amainaría alrededor de las 21:00, por lo que se redujo la velocidad a 3 nudos para reducir el balance [21].

A las 16:43 horas del día 14, y sin previo aviso, el buque escoró a una banda de forma extrema, llegando a un ángulo de 38 grados. Hasta recuperar la normalidad dentro de la tormenta, el buque escoró un total de 7 veces, haciendo que parte de la carga cayese por la borda. Posteriormente a este evento, el capitán avisó a las autoridades pertinentes de la pérdida de la carga, y de la posibilidad de contenedores a la deriva en la zona en la que se encontraba.

Se implementaron ambos turnos en la tripulación para mayor seguridad, pero no fue suficiente. Tres horas más tarde, el buque volvería a experimentar ángulos de escora máximos, en este caso hasta 41 grados, perdiendo otra parte de la carga. En este momento se declaró la situación de emergencia, pasando a realizar las operaciones protocolarias de dicha alarma.

La segunda vez que el buque se escoró de forma violenta, el capitán al mando ordenó, además de la declaración de emergencia, aumentar la velocidad a 5 nudos, ya que se supuso un posible fallo por resonancia paramétrica. El cambio de frecuencias en la llegada de las olas ayudaría a dejar que el fenómeno sucediese [21].

Como se había predicho desde las estaciones de condiciones meteorológicas, a partir de las 21:00 de ese día, las condiciones comenzarían a mejorar. El buque no sufrió ningún otro episodio de balance violento. Con la mejora del tiempo, la tripulación pudo observar los daños ocasionados por el fenómeno. Muchas de las trincas de amarre del sistema de carga se encontraban dañadas, además del daño estructural en los propios contenedores



Figura 2.9 Daños en el Svendborg Maersk producidos por resonancia paramétrica [21]



Figura 2.10 Estado de los elementos de trincado en el Svendborg Maersk [21]

El día 17 de Febrero, el buque llegó a Málaga, donde se realizaron las labores de reparación y retiro de los contenedores que se encontrasen en malas condiciones o dañados. Además de las reparaciones, se asistió psicológicamente a los miembros de la tripulación por los incidentes ocurridos. Uno de los miembros de la tripulación fue hospitalizado por daños menores, mientras que 4 de los tripulantes dimitieron voluntariamente.

Posterior al accidente, se realizaron análisis sobre el mismo, determinando que se trataba de un nuevo caso de resonancia paramétrica. Los últimos reportes de accidentes comunicados sobre resonancia paramétrica databan del año 2007, por lo que la tripulación, a pesar de encontrarse entrenada y documentada, no llegó a detectar el problema antes de los episodios de escora extrema. Normalmente no se le da una gran importancia a este fenómeno por su rara aparición, a pesar de que los buques disponen de información y CDs explicativos sobre la resonancia [21].

Los contenedores perdidos ascendieron a un total de 517, lo cual lo sitúa en una de las mayores pérdidas de carga de contenedores en el sector. Otro aspecto interesante en el accidente es la dimisión de varios de los miembros de la tripulación, lo cual indica que, por miedo, los tripulantes no quieren seguir navegando. Sería necesario asegurar la vida en la mar incluso contra este tipo de fenómenos mediante sistemas para prevenir la resonancia paramétrica, o sistemas que puedan predecir el fenómeno para que la tripulación tenga margen a la hora de tomar medidas correctivas.

En cuanto al tiempo meteorológico, el buque debería de haber sido capaz de combatir la tormenta sin mucho problema. Se trata de una condición en la que hay que tomar precauciones, pero que no se considera de emergencia primeramente. En zona del Atlántico

Norte, más concretamente en las aguas del Reino Unido, es común tener un periodo de tormentas de invierno, lo cual hace el tránsito más peligroso, pero no de condiciones extremas.

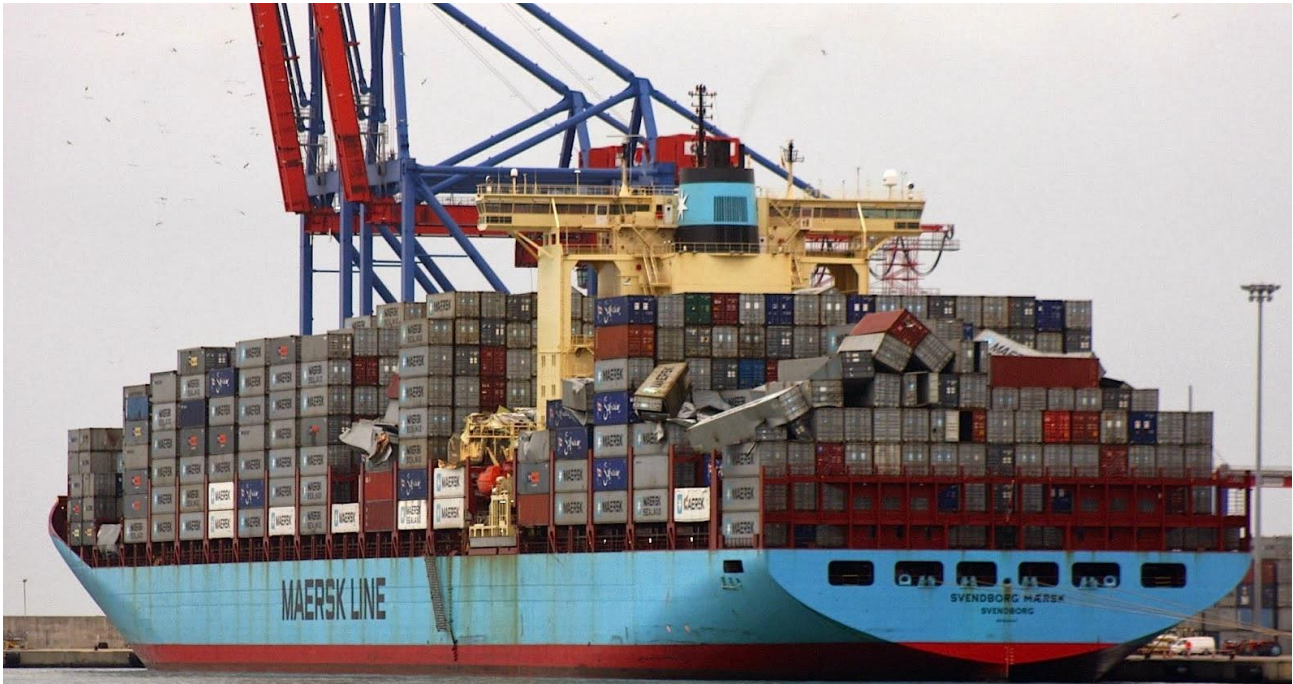


Figura 2.11 Svendborg Maersk en Málaga, después del accidente “<https://eideard.com>” [En línea, 22 de Noviembre de 2017]

Todos los buques anteriormente citados y comentados tienen una característica en común que los hace susceptibles a la resonancia paramétrica: son portacontenedores. Al tratarse de buques con un abanico muy amplio para albergar mucha más carga que si no lo tuviesen, las formas en proa y popa son mucho más finas que en la parte media del buque.

Al pasar la ola con la frecuencia problemática (dos veces la frecuencia natural del buque), la variación de alturas y brazos metacéntricos ayuda a aumentar la escora en muy pocos balances.

Pero no todos los buques que sufren de resonancia paramétrica son portacontenedores. Existen casos de buques Ro-Ro y buques cruceros que han sufrido episodios similares.

Posiblemente uno de los casos más llamativos de este fenómeno en cruceros es el caso del Voyager, en el 2005. En su viaje de Barcelona a Menorca, una gran ola impactó contra el puente y rompió uno de los cristales de la banda de babor, inutilizando los propulsores y las aletas estabilizadoras[5]. Una vez recuperada la propulsión, el buque comenzó a avanzar a 4-5 nudos de velocidad. En ese momento, se produjeron ángulos de escora extremos que se repitieron varias veces.

El evento fue filmado desde un helicóptero después de recibir una llamada de emergencia del propio buque. Se produjeron una gran cantidad de daños en el mobiliario del

buque y personas heridas. Uno de los pasajeros que fue herido debido al movimiento de inmoviliario murió unos días después.



Figura 2.12 Voyager intentando combatir una tormenta (resonancia paramétrica) <https://www.youtube.com/watch?v=tVoMtPFtEg0> [En línea, 22 de Noviembre de 2017]

Bajo todo punto de vista, el fallo por resonancia paramétrica en un buque de pasaje no ha de ocurrir, ya que se compromete la vida de los pasajeros que se encuentren en el mismo. Además, se incurre en un daño en material de mobiliario alto (los muebles dispuestos en cualquier zona del buque se arrastrarían de un lado a otro a medida que el buque se escora)

Además de estos dos tipos de buques, se encuentran los buques pesqueros. Este tipo de embarcaciones son de un tamaño bajo-medio, muy susceptibles a fallos por estabilidad, ya que sus características de estabilidad son bajas (bajo GM, bajo GZ, bajo valor de áreas mínimas bajo la curva de GZs...). Estos buques son muy utilizados en el análisis del fenómeno, como se pueden observar, por ejemplo, en [5], [22].

Los buques de pesca, a pesar de tener bajas condiciones de estabilidad, no presentan grandes abanicos como se podían observar en los buques cruceros o los portacontenedores. Algunos de los buques pesqueros que tienen más posibilidad de caer en el fenómeno de resonancia son los arrastreros españoles, que presentan en la popa la entrada del arte de arrastre, por lo que las formas en popa han de ser amplias.

Sin embargo, los buques pesqueros, al tener una estabilidad tan baja, los fallos por estabilidad normalmente no se consideran fallos por resonancia paramétrica, por lo que no existen casos presentados de pesqueros que hayan sufrido este fenómeno. Muchos de los autores expuestos anteriormente basan sus hipótesis en buques pesqueros que, mediante ensayos en canal, se determina que sufren el fenómeno de resonancia, por lo que se consideran susceptibles al fallo.

3 ANÁLISIS DE LA RESONANCIA PARAMÉTRICA

Ahora que ya se conoce el fenómeno en cierta medida y que se ha visto las repercusiones que pueden tener en buques que navegan en estos momentos por los mares, se comenzará a realizar los modelos matemáticos y físicos necesarios para la caracterización del fenómeno.

El buque a analizar será el MFV Trident, un buque pesquero, más concretamente arrastrero, del que se dispone el modelo físico. Este buque ha sido elegido por la conveniencia del modelo y porque es un tipo de buque que carece de una gran cantidad de estabilidad, lo cual lo hace más susceptible a fenómenos como el que se está describiendo en este trabajo.

El buque presenta unas formas habituales en un pesquero de este tamaño, con unas formas afinadas en proa y un ligero afinamiento en popa para aprovechar al máximo en la zona central. En la zona de popa se encuentra una pequeña zona de trabajo, donde los pescadores realizarían labores de largado del arte. Presenta además un quillote central hecho de un material de alta densidad para mejorar la estabilidad, reduciendo el centro de gravedad. El buque dispone de bulbo

Las características y formas del buque son las que se muestran a continuación:

Eslora total	25,91 m
Eslora entre perpendiculares	22,09 m
Manga	6,68 m
Puntal hasta la cubierta principal	3,35 m
Calado de diseño	2,48 m
Desplazamiento de diseño	170,3 t

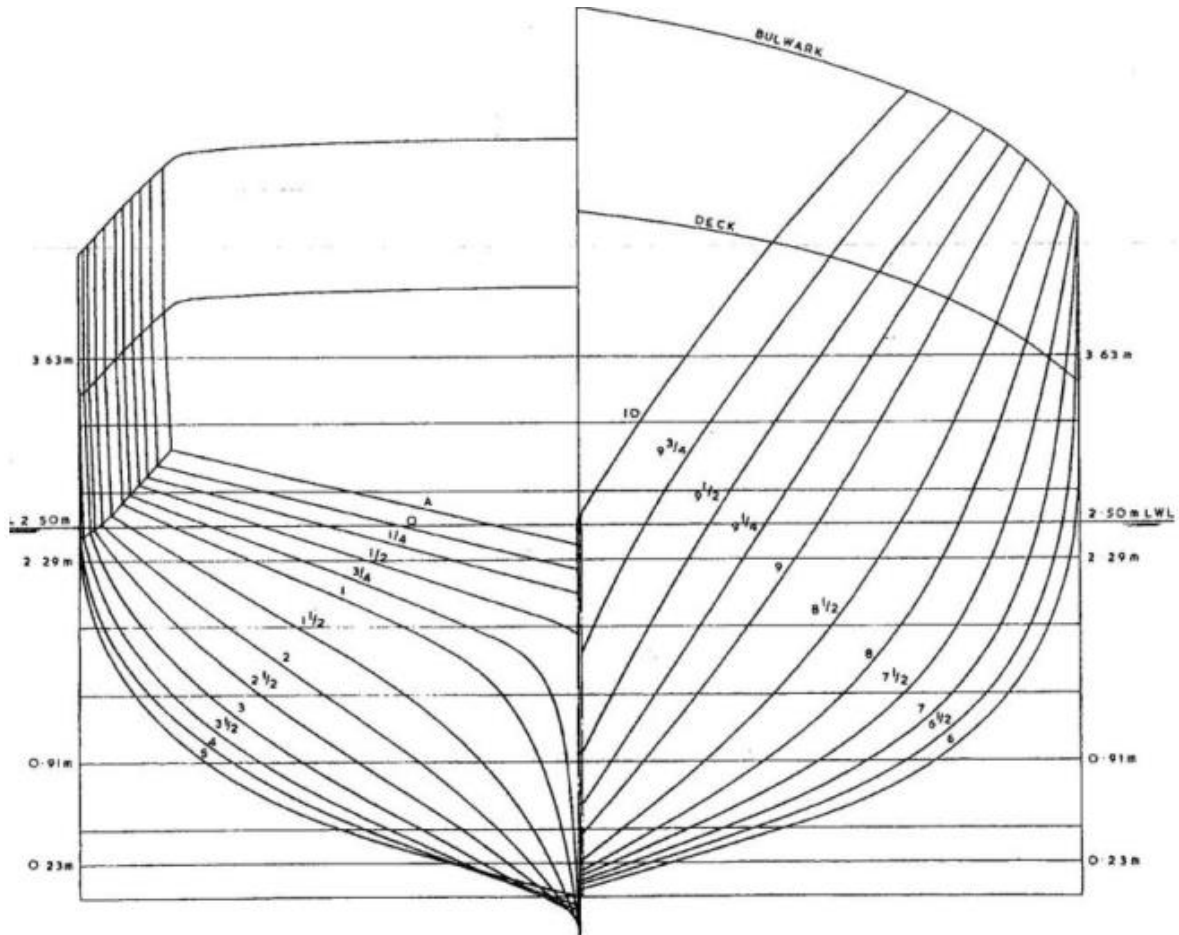
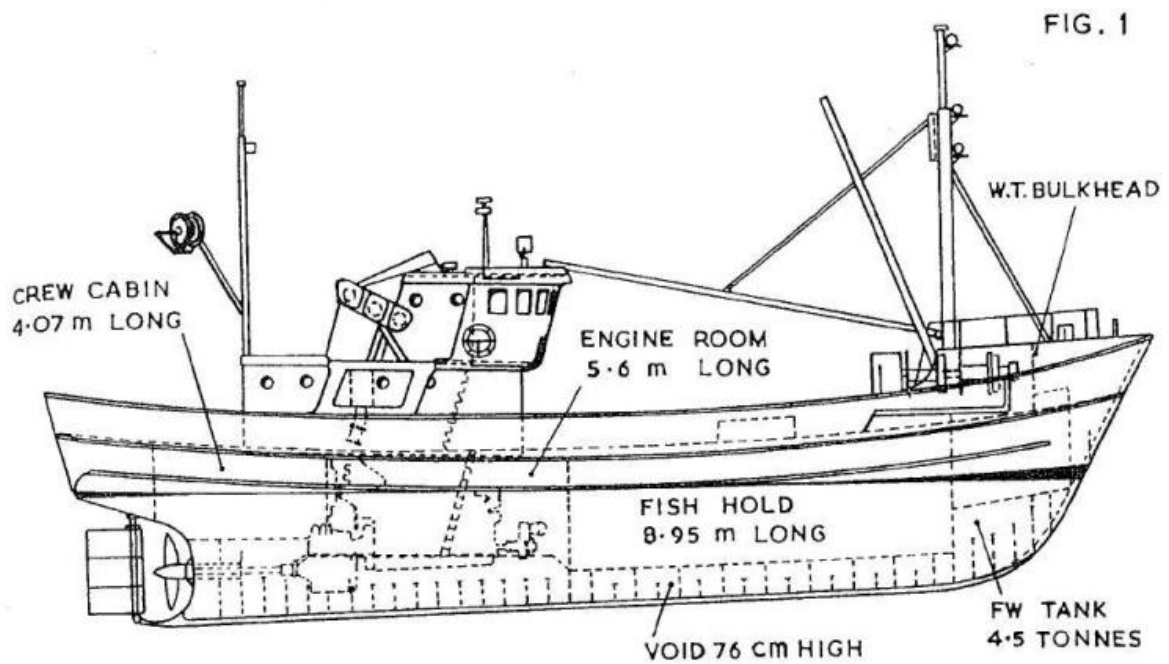
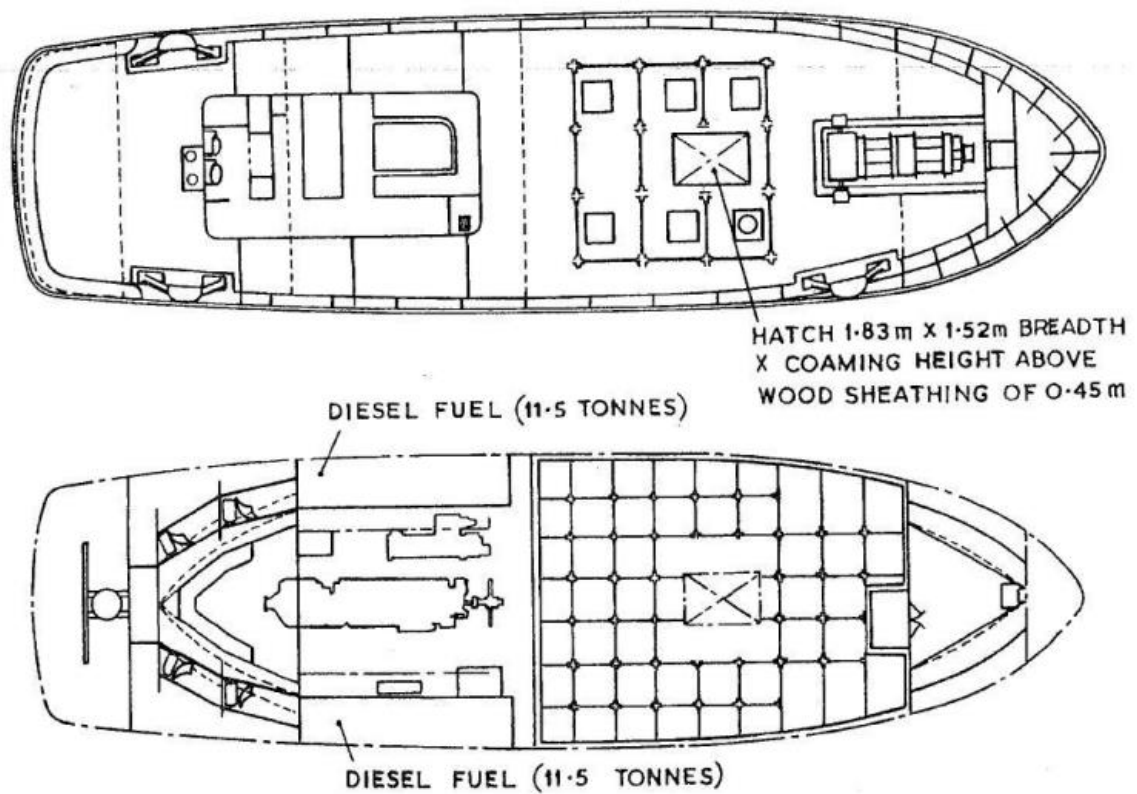


Figura 3.1 Formas del MFV Trident





GENERAL ARRANGEMENT — MFV TRIDENT

Figura 3.2 Vistas del MFV Trident



Figura 3.3 Fotografía del MFV Trident

Para realizar un análisis completo de cómo le afectaría la resonancia paramétrica a este buque se realizará primero un modelo matemático de los movimientos relacionados con el fenómeno. Posteriormente se realizarán una cantidad de ensayos en canal que tendrán las mismas características que como se modeló de forma matemática. Con ello, se podrán comparar los resultados de ambas experimentaciones y sacar conclusiones sobre las mismas.

Dentro de estas características se incluye la condición de carga a utilizar. Tanto el buque a escala como los datos obtenidos en el modelo matemático han de considerar la misma condición de carga para poder realizar comparaciones. Los valores a considerar para los análisis correspondientes a la condición de carga son los siguientes:

Calado del buque	2,507 m
Desplazamiento	185 t
Trimado inicial	0
GM transversal	A determinar

Esta condición de carga concreta ha sido establecida para poder comparar los datos obtenidos en el modelo matemático y en el análisis experimental con valores ya obtenidos de otros análisis (datos obtenidos en el texto [5])

A continuación se explicarán los fundamentos en los que están basados los modelos, tanto físico como matemático, y cómo se generan. Nótese que se utilizará dos modelos matemáticos, uno más simplificado, con un término de restauración más sencillo (que asumirá las simplificaciones derivadas de los pequeños movimientos) y otro complejo, no lineal (utilizando el valor de brazo adrizante).

Se ha introducido primero la generación de modelos matemáticos. Estos modelos requieren de algunos datos obtenidos de experiencias explicadas en el apartado destinado a los ensayos en canal, por lo que se mostrará a continuación una tabla resumen con estos valores. El apartado correspondiente a la obtención de estos valores será el 3.2

GM buque	0.446	M
B44b	516.228	(t·m ²)/s
B44a	6.871	t·m ²
Frecuencia natural	0.941	rad/s

3.1 Modelo matemático

Para saber en qué casos se produciría la resonancia paramétrica en un buque en concreto, parece lógico generar primero un modelo y someterlo a diversas condiciones. Estas condiciones han de abarcar un amplio número de situaciones, entre las que se encuentren las más problemáticas para el buque. Por ello, parece que el procedimiento correcto será la utilización de un modelo matemático.

En este apartado del presente trabajo se explicará de forma detallada como obtener los valores utilizados en el modelo matemático, así como la generación del mismo, de dos maneras diferentes. Se utilizarán diversos programas para la obtención de valores necesarios para realizar el cálculo, explicando también su funcionamiento.

3.1.1 Modelo matemático simplificado

Para el modelo matemático simplificado se utilizarán las consideraciones realizadas cuando existen pequeños movimientos. Esto quiere decir que se utilizarán los valores de alturas metacéntricas en el cálculo explicado en el apartado 2. El programa de cálculo elegido para obtener los valores que serán posteriormente comparados con los ensayos en canal ha sido el "Matlab". Se ha elegido este programa debido a la facilidad con la que se pueden solucionar ecuaciones diferenciales de segundo orden, característica interesante para este análisis.

Como se ha explicado en el apartado 2, la ecuación a solucionar sería:

$$(I_{xx} + A_{44}) \cdot \ddot{\phi} + (B_{44a} + B_{44b} \cdot \dot{\phi}) \cdot \dot{\phi} + C_{44} \cdot \phi = 0$$

Introduciendo las simplificaciones en las que se han incurrido, el término C_{44} se puede simplificar en una expresión sinusoidal dependiente de la altura metacéntrica. Este valor se debe a la influencia que tiene la ola en la altura metacéntrica (mayor sumersión del casco origina un cambio en la altura):

$$C_{44} = \Delta \cdot (GM_0 + GM_a \cdot \cos(\omega_e t)) \quad [18]$$

La ecuación a solucionar es, por lo tanto, una ecuación diferencial de segundo orden. El programa utilizado no puede solucionar ecuaciones de segundo orden como tal, pero sí se pueden solucionar si se genera un sistema de ecuaciones con el mismo. Si se realiza un cambio de variable para el valor derivado (en este caso, $\dot{\phi}$), la ecuación de segundo orden se convierte en una ecuación de dos variables de primer orden. Esta nueva ecuación sí puede ser solucionada por el programa, permitiendo obtener soluciones. De esta manera, el sistema quedaría:

$$(I_{xx} + A_{44}) \cdot \dot{\alpha} + (B_{44a} + B_{44b} \cdot \alpha) \cdot \alpha + \Delta \cdot (GM_0 + GM_a \cdot \cos(\omega_e t)) \cdot \phi = 0$$

$$\alpha = \phi \quad [19]$$

Para solucionar este sistema, existe una función implementada en el programa llamada "ode45". Esta función Range-Kutta se utiliza para solucionar ecuaciones de segundo orden o mayores expresadas de esta manera, obteniendo una velocidad en el cálculo razonable. Es la más utilizada en la solución de ecuaciones diferenciales lineales. Los resultados serán la respuesta del buque en el tiempo (un intervalo definido). En el script, las igualdades se traducirían de la siguiente forma:

```
dydt=zeros(2,1);  
dydt(1)=y(2);  
dydt(2)=(-(C44*sin(y(1)))-(B44a*y(2)+B44b*y(2)*abs(y(2))))/(Ixx+A44);
```

En el script, "y(1)" correspondería a la variable ϕ , "y(2)" a su derivada, mientras que "dydt(1)" sería α y "dydt(2)" su derivada. La última línea del script correspondería al despeje de $\dot{\alpha}$. De esta forma se constatarían las relaciones entre las dos variables.

Ahora que ya se conoce como se debería solucionar el sistema, es necesario introducir qué es lo que se quiere hacer. Lo que se consiguen con los análisis realizados en el canal es obtener funciones de respuesta del buque a una excitación generada (que en este caso será la ola generada por la pala). Si la ecuación diferencial de segundo orden corresponde a la respuesta en el grado de libertad de balance, los valores que dependan de la ola genera corresponderán a cómo la ola excita al modelo.

La inercia y masa añadida son valores constantes obtenidos de ensayos en canal. Se ha considerado utilizar simplificaciones en cuanto a los amortiguamientos, por lo que no dependerán del brazo adrizante. Sin embargo, tanto la altura metacéntrica como la frecuencia de encuentro varían dependiendo de la ola a desarrollar.

Como anteriormente se ha indicado, la frecuencia de encuentro se calcula de la siguiente forma:

$$\omega_e = \omega_w - \frac{\omega_w^2}{g} \cdot u \cdot \cos(\beta) \quad [20]$$

Como se ha comentado en el capítulo anterior, el ángulo a considerar siempre será 180°.

La altura de ola influye en la variación de las alturas metacéntricas, por lo que también es necesario calcularla. La altura de ola depende de la longitud de onda y de la pendiente de ola (relación entre altura y longitud).

$$S_w = \frac{H}{\lambda} \quad [21]$$

De esta manera, en el programa tomaría la siguiente forma:

```
w_e=frec_ola(i) - (frec_ola(i)^2/g)*Vbuque*cos(alfa_encuentro);  
longitud_ola=2*pi*g/(frec_ola(i)^2);  
H_ola=pendiente_ola(j)*longitud_ola;
```

El valor de altura de ola se introducirá posteriormente en el cálculo de alturas metacéntricas. La longitud de ola es dependiente de la frecuencia elegida.

Después de haber reflexionado sobre todas las consideraciones anteriores, los valores que se calcularán posteriormente con diversas herramientas son:

- I_{xx}
- A_{44}
- B_{44a}
- B_{44b}
- GM_0
- GM_a

Y los valores a introducir serán los que caractericen la ola (frecuencia y pendiente de ola). La velocidad del buque sería un valor a considerar, aunque los ensayos podrían realizarse a velocidad nula, obteniendo la igualdad entre frecuencia de encuentro y frecuencia de la ola.

El script generado para el programa será adjuntado como anexo a este trabajo de análisis [Anexo 7]. En este momento ya se podrían obtener resultados orientativos si se utilizasen valores tipo para las variables aún no calculadas listadas anteriormente.

Para ilustrar el proceso, si se solucionase la ecuación diferencial con valores tipo, considerando un intervalo de frecuencias entre 0,4 y 2,4 (considerando 41 olas, con un paso de 0,05), y seis pendientes de olas definidas ($\frac{1}{200}, \frac{1}{100}, \frac{1}{50}, \frac{1}{30}, \frac{1}{20}$ y $\frac{1}{15}$) se obtendrían seis grupos de funciones de respuestas, una por cada frecuencia considerada en el análisis. Se observan a continuación las series temporales para la primera de las pendientes.

Si se observa de cerca (en la imagen se ven los primeros 20 segundos de un total de 500 introducido en el solucionador de ecuaciones diferenciales) se pueden ver dos tipos de respuesta. Existen una cantidad de respuestas que aumentan su amplitud rápidamente a medida que pasa el tiempo, obteniendo valores que se salen de la imagen a los 10 segundos. Por otro lado, hay respuestas que oscilan cercanas al 0, sin aumentar progresivamente.

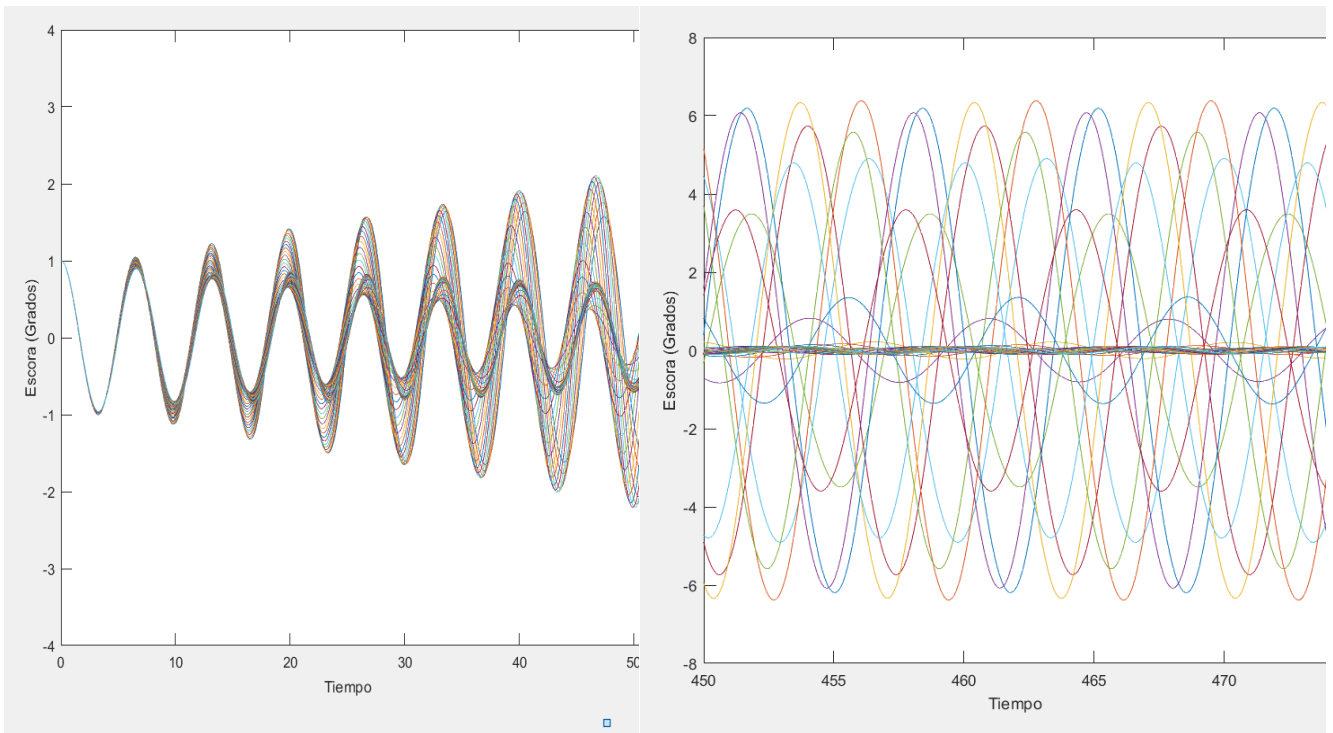


Figura 3.4 Series temporales para pendiente 1/200

Comparando dos series temporales, una en la que se observa resonancia y otra sin ella, se obtienen las siguientes figuras:

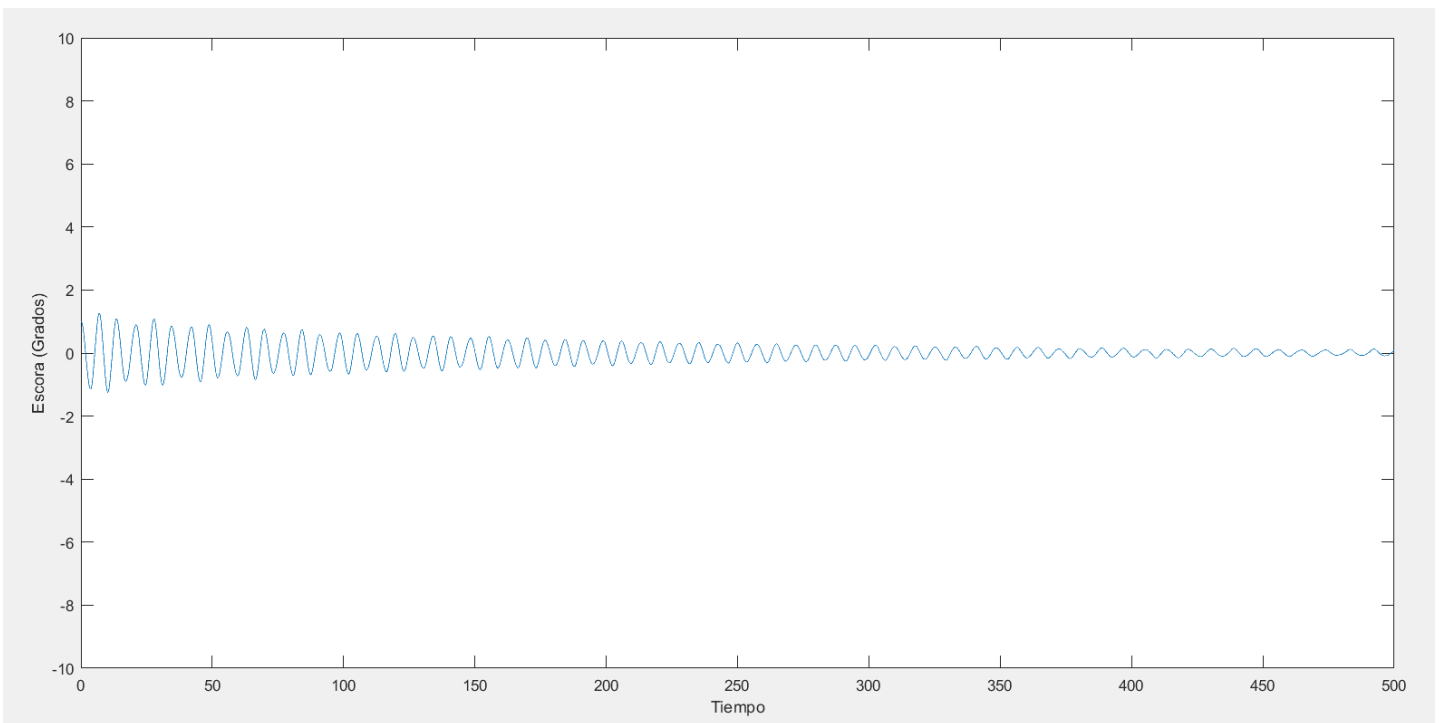


Figura 3.5 Ejemplo de serie temporal sin resonancia

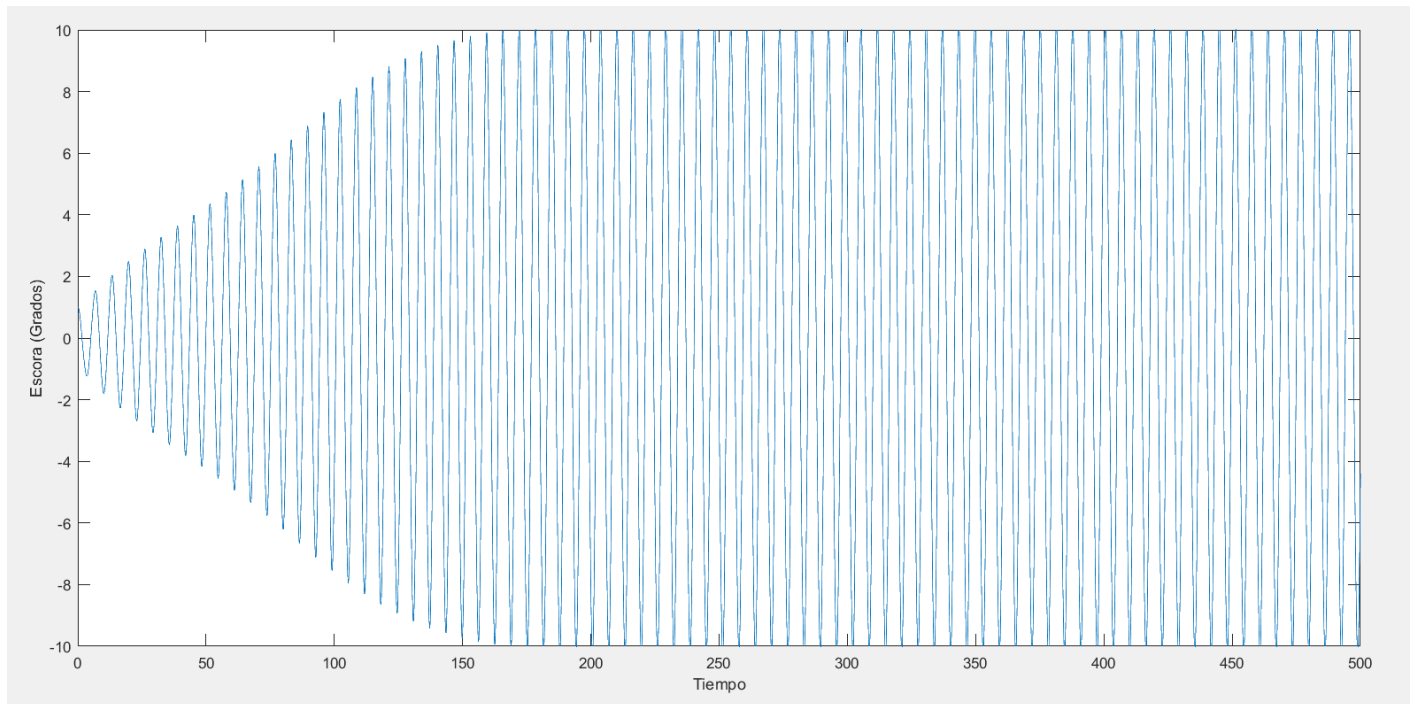


Figura 3.6 Ejemplo de serie temporal con resonancia

Las primeras respuestas serán las correspondientes a las frecuencias que entran en resonancia. Este valor no se amortiguaría, sólo dejaría de aumentar cuando el valor del elemento de amortiguamiento fuese lo suficientemente grande. Esto corresponde a la figura 3.6, donde se ve una serie que se detiene a los 10 grados de amplitud.

En cuanto a las segundas respuestas, serían todos aquellos valores que no entran dentro de la resonancia, por lo que acaban por ser amortiguados. En la segunda figura se pueden ver como todas las respuestas generadas por las frecuencias de este tipo acaban siendo prácticamente 0. Se corresponde a la figura 3.5, que se reduce hasta el mínimo.

Realizar el análisis de frecuencias de esta forma proporciona mucha información sobre las respuestas del buque a las diversas frecuencias consideradas. Ahora, una vez obtenidas las respuestas del buque para cada caso analizado de pendiente y frecuencia de ola, sería de interés saber cuáles de ellas son las que producen una resonancia mayor o menor dependiendo de sus características.

Para poder obtener esta filtración, se podría, por ejemplo, observar los valores de las frecuencias para tiempos avanzados. Como se ha comentado anteriormente, en los valores finales de tiempo, las frecuencias de resonancia tienen grandes valores de amplitud de balance, mientras que las demás tienen valores prácticamente nulos amortiguados. Es necesario realizar el análisis en los valores más alejados al inicio de la excitación para evitar que las frecuencias amortiguadas no obtengan sus máximos en la propia excitación.

Para filtrar las frecuencias en el software utilizado, se han de coger los valores cercanos al final y obtener los máximos de cada una de ellas. De esta manera, queda asegurado que el régimen obtenido es el permanente. En el script se puede ver que se

escogen los 1000 últimos valores (los que van de 450 a 500 segundos) para obtener esta filtración.

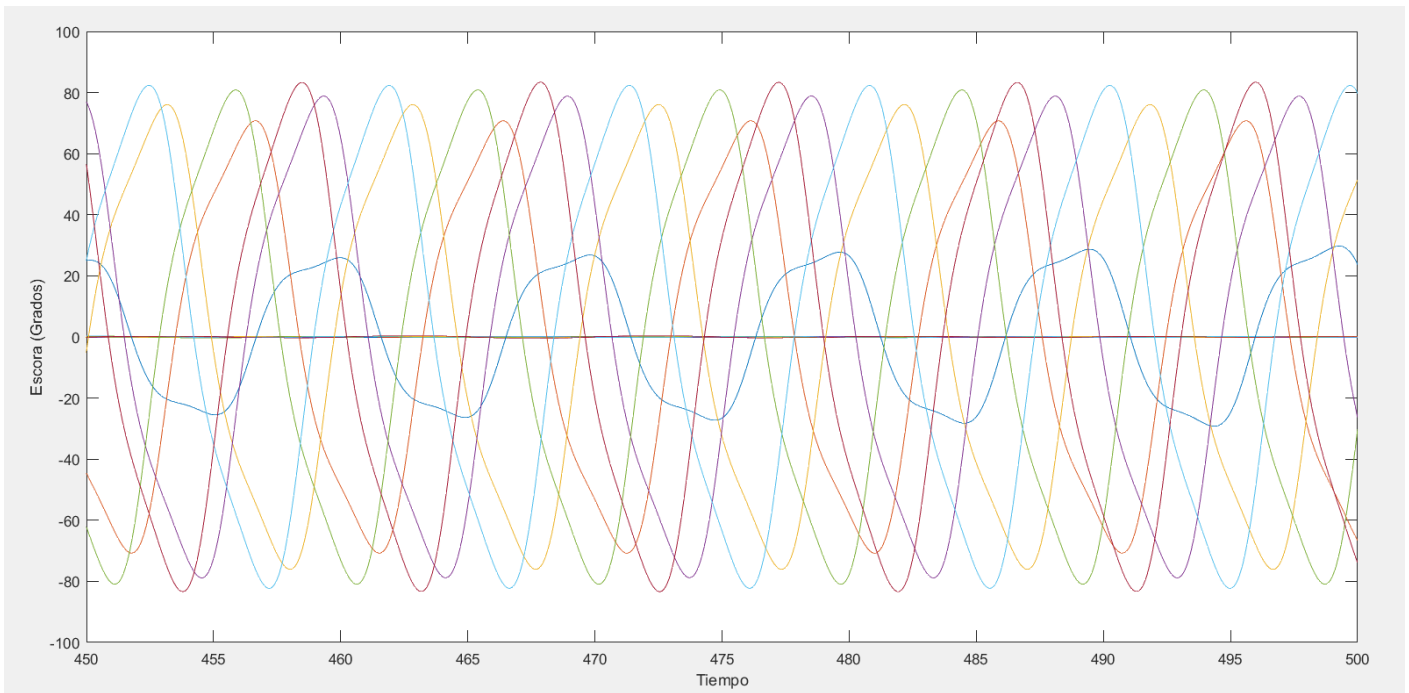


Figura 3.7 Frecuencias filtradas en radianes

La imagen anterior (Figura 3.7) muestra los valores de las excitaciones en el intervalo final de tiempo de 50 segundos. Ahora, con esta representación, se puede ver cuáles de las frecuencias serían las que producen una excitación resonante. Sería suficiente ver a qué frecuencia se producen las mayores excitaciones.

Si ahora se representasen los valores máximos de las excitaciones frente a las frecuencias generadas, se obtendría, para una pendiente concreta, la siguiente figura:

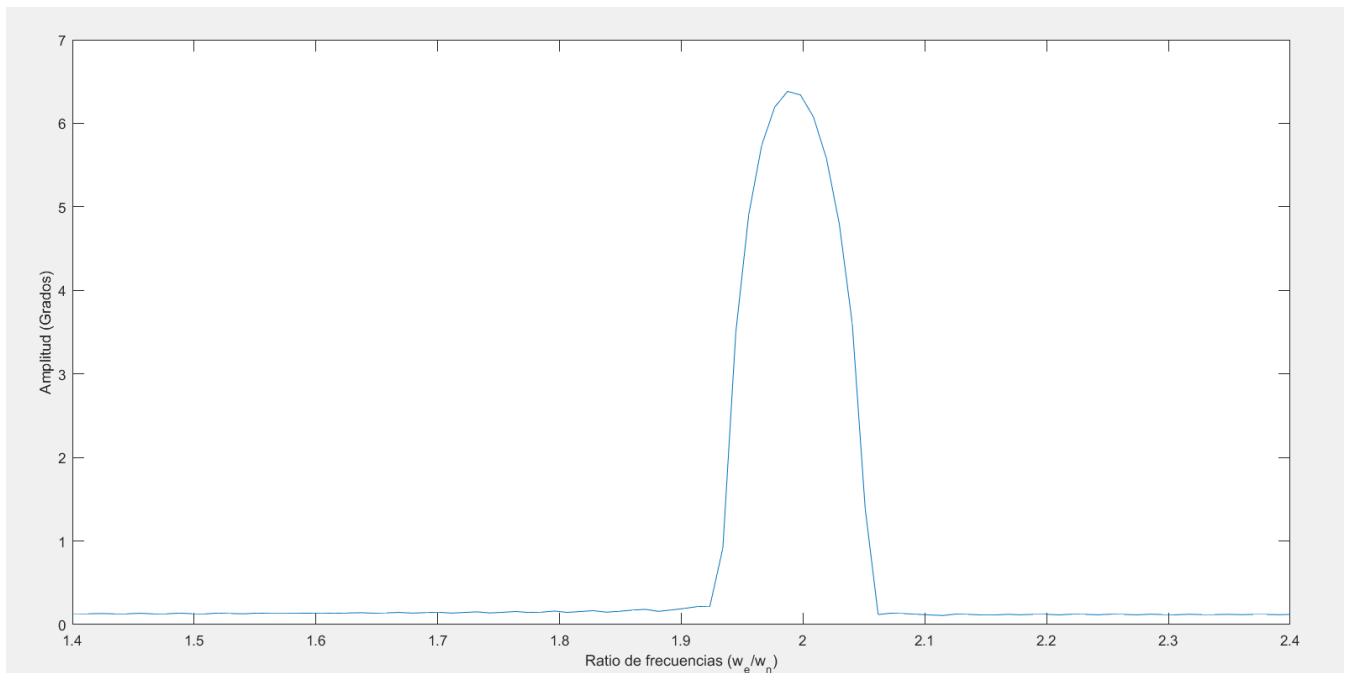


Figura 3.8 Resultados para pendiente 1/200

De esta última imagen se obtiene que las frecuencias de encuentro que generan la mayor excitación se encuentran en torno a 1,8 radianes por segundo. Es razonable pensar que la frecuencia natural del buque se encuentra en la mitad de este valor, ya que es cuando se produce la resonancia paramétrica las frecuencias se encuentran cerca del doble de la frecuencia natural.

Las gráficas anteriores corresponderían a valores tipo, datos que habrá que calcular posteriormente con ensayos físicos o con otro software. Tanto los términos de inercia y masa añadida como los términos de amortiguamiento se extraerán de la parte experimental (se realizarán diversos análisis en el canal con el modelo para obtener estos valores). De esta manera, se obtendrán valores exactos para el buque a analizar. A continuación se mostrarán los diversos programas utilizados para los cálculos de los valores necesarios.

3.1.1.1 Obtención de los valores GM_0 y GM_a

Para obtener un modelo más exacto (obtener un modelo de 1,5 grados de libertad) se ha planteado la opción de tener varias alturas metacéntricas para cada una de las olas a generar. En anteriores apartados, se puede ver la dependencia que existe entre la altura metacéntrica y la característica de las olas. Este valor varía con respecto al que se conoce de aguas tranquilas.

La generación de la altura metacéntrica en una ola en concreto se determina por medio de dos elementos diferentes:

- El valor de GM_0 , que sería la media de todos los valores obtenidos de GM a medida que pasa la ola.
- El valor de GM_a , correspondiente a la diferencia entre el valor máximo de GM y el mínimo a medida que pasa la ola.

Para obtener los valores a utilizar en cada una de las frecuencias definidas se ha utilizado el software Maxurf Stability Design. Con el software y las formas del buque, se pueden obtener una gran cantidad de valores para una condición de carga establecida. A continuación se pueden ver las formas utilizadas y un análisis realizado a modo de ejemplo.

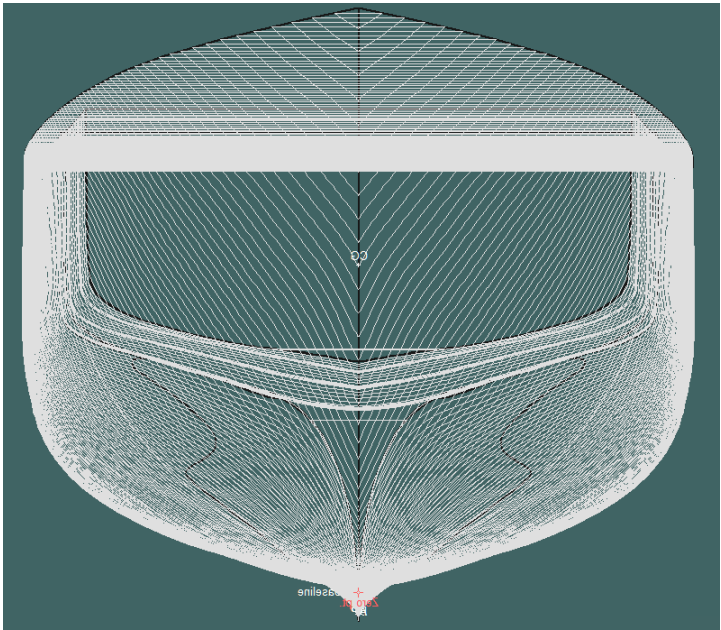
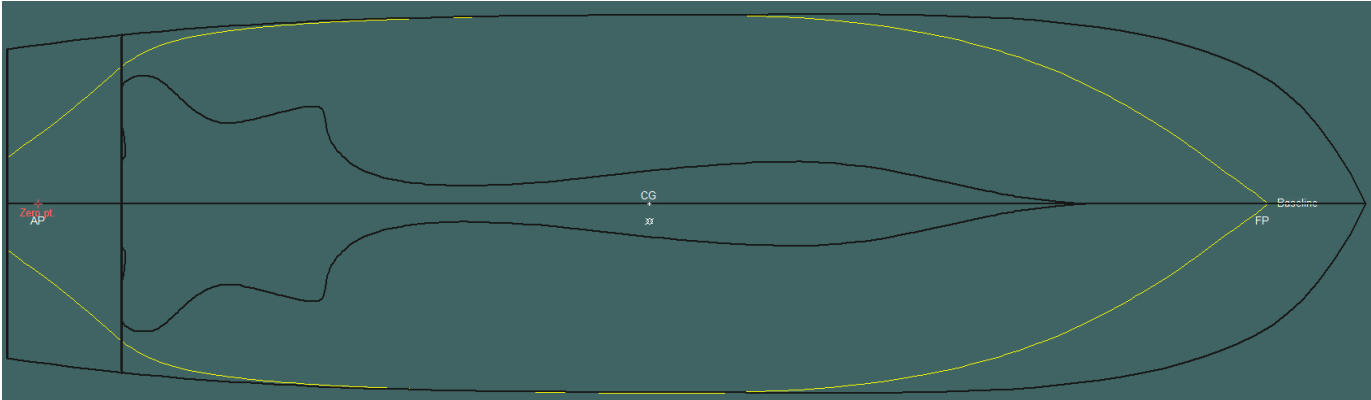
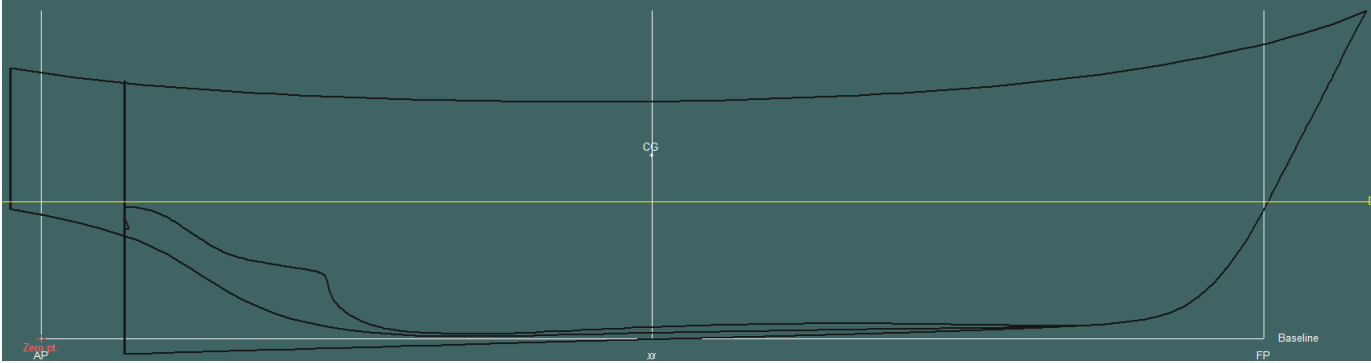


Figura 3.9 Formas del buque

3 Análisis de la resonancia paramétrica

Juan González Santomé

	Wave Phase	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95
1	Draft Amidships m	2.490	2.473	2.446	2.409	2.364	2.315	2.266	2.224	2.191	2.163	2.150	2.160	2.192	2.243	2.304	2.367	2.424	2.468	2.493	2.498
2	Displacement t	170.3	170.3	170.3	170.3	170.3	170.3	170.3	170.3	170.3	170.3	170.3	170.3	170.3	170.3	170.3	170.3	170.3	170.3	170.3	170.3
3	Heel deg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	Draft at FP m	2.734	2.432	2.114	1.802	1.519	1.292	1.148	1.116	1.240	1.593	2.073	2.576	3.025	3.367	3.569	3.632	3.573	3.430	3.233	3.003
5	Draft at AP m	2.246	2.514	2.777	3.016	3.209	3.338	3.385	3.333	3.142	2.733	2.227	1.744	1.359	1.119	1.039	1.102	1.275	1.506	1.752	1.992
6	Draft at LCF m	2.471	2.477	2.478	2.473	2.463	2.445	2.416	2.365	2.272	2.177	2.151	2.164	2.209	2.274	2.344	2.405	2.446	2.463	2.463	2.462
7	Trim (+ve by stern) m	-0.488	0.082	0.663	1.214	1.691	2.047	2.238	2.217	1.902	1.140	0.154	-0.832	-1.666	-2.248	-2.530	-2.297	-1.924	-1.481	-1.011	
8	WL Length m	22.314	22.694	22.539	22.390	22.251	22.132	22.048	22.021	22.079	22.258	21.864	20.715	21.004	21.246	21.391	21.426	21.365	21.246	21.102	21.531
9	Beam max extents on WL m	6.506	6.539	6.616	6.694	6.761	6.808	6.834	6.843	6.843	6.842	6.842	6.843	6.843	6.840	6.828	6.803	6.765	6.713	6.644	6.575
10	Wetted Area m²	176.82	175.41	173.50	171.28	168.86	166.35	163.69	159.81	152.43	145.63	144.46	145.21	147.49	150.97	155.26	159.82	163.71	168.66	173.79	177.17
11	Waterpl. Area m²	132.99	131.49	129.82	128.18	126.60	124.98	122.96	118.98	111.12	103.27	102.01	102.31	103.95	106.74	110.49	114.74	119.15	124.16	129.64	133.32
12	Prismatic coeff. (Cp)	0.740	0.689	0.663	0.639	0.614	0.587	0.557	0.527	0.501	0.481	0.484	0.516	0.525	0.544	0.573	0.609	0.652	0.703	0.765	0.817
13	Block coeff. (Cb)	0.352	0.337	0.335	0.340	0.352	0.370	0.393	0.404	0.388	0.375	0.378	0.400	0.400	0.404	0.410	0.416	0.417	0.412	0.403	0.378
14	Max Sect. area coeff. (Cm)	0.689	0.701	0.712	0.725	0.735	0.746	0.756	0.767	0.776	0.782	0.783	0.778	0.767	0.750	0.728	0.702	0.674	0.635	0.598	0.530
15	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.916	0.886	0.871	0.855	0.842	0.829	0.816	0.790	0.736	0.678	0.682	0.722	0.723	0.734	0.757	0.787	0.824	0.870	0.925	0.942
16	LCB from zero pt. (+ve fwd) m	11.068	11.024	10.978	10.934	10.895	10.865	10.849	10.851	10.877	10.939	11.018	11.097	11.164	11.211	11.236	11.237	11.215	11.183	11.146	11.108
17	LCF from zero pt. (+ve fwd) m	10.171	10.091	9.990	9.875	9.757	9.644	9.565	9.644	10.112	10.777	10.978	11.144	11.269	11.353	11.394	11.376	11.259	10.995	10.602	10.272
18	KB m	1.628	1.629	1.618	1.597	1.574	1.554	1.544	1.546	1.560	1.575	1.579	1.572	1.557	1.542	1.533	1.536	1.550	1.571	1.594	1.615
19	KG fluid m	3.329	3.329	3.329	3.329	3.329	3.329	3.329	3.329	3.329	3.329	3.329	3.329	3.329	3.329	3.329	3.329	3.329	3.329	3.329	3.329
20	BMT m	2.410	2.378	2.348	2.325	2.308	2.292	2.255	2.138	1.975	1.902	1.874	1.871	1.891	1.929	1.986	2.059	2.144	2.234	2.326	2.406
21	BML m	29.428	28.579	27.559	26.464	25.335	24.180	22.920	20.937	17.076	13.146	12.755	12.963	13.718	14.986	16.758	18.867	21.139	23.891	27.174	29.545
22	GMt corrected m	0.709	0.679	0.636	0.591	0.548	0.509	0.461	0.347	0.199	0.146	0.124	0.113	0.114	0.133	0.179	0.254	0.356	0.469	0.587	0.690
23	GML m	27.727	26.879	25.847	24.730	23.575	22.397	21.126	19.146	15.301	11.390	11.005	11.205	11.941	13.189	14.951	17.062	19.350	22.126	25.435	27.828
24	KMt m	4.038	4.008	3.965	3.919	3.875	3.836	3.788	3.674	3.528	3.475	3.453	3.442	3.443	3.461	3.506	3.582	3.683	3.797	3.915	4.018
25	KML m	31.049	30.208	29.165	28.022	26.835	25.631	24.348	22.379	18.573	14.704	14.333	14.526	15.236	16.451	18.182	20.280	22.575	25.372	28.707	31.128
26	Immersion (TPc) tonne/cm	1.330	1.315	1.298	1.282	1.266	1.250	1.230	1.190	1.111	1.033	1.020	1.023	1.040	1.067	1.105	1.147	1.192	1.242	1.296	1.333
27	MTc tonne.m	2.138	2.072	1.993	1.907	1.817	1.727	1.629	1.476	1.180	0.878	0.848	0.864	0.921	1.017	1.153	1.315	1.492	1.706	1.961	2.145
28	RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	2.107	2.017	1.890	1.755	1.629	1.513	1.370	1.030	0.592	0.434	0.367	0.336	0.338	0.395	0.531	0.755	1.057	1.395	1.745	2.050
29	Max deck inclination deg	1.2662	0.2134	1.7199	3.1460	4.3764	5.2937	5.7845	5.7311	4.9206	2.9536	0.3986	2.1572	4.3142	5.8099	6.5345	6.5345	5.9377	4.9773	3.8362	2.6209
30	Trim angle (+ve by stern) deg	-1.2662	0.2134	1.7199	3.1460	4.3764	5.2937	5.7845	5.7311	4.9206	2.9536	0.3986	-2.1572	-4.3142	-5.8099	-6.5345	-6.5345	-5.9377	-4.9773	-3.8362	-2.6209

Figura 3.10 Ejemplo de reporte de Maxsurf Stability Design

Los datos de la tabla anterior son diversos valores generados a partir del cálculo de equilibrio del buque a medida que pasa la ola. En la parte superior de la tabla se muestra dónde se encuentra la cresta de la ola. Por lo tanto, el valor 0 sería la cresta en la proa, mientras que el valor 0,5 sería la cresta en el centro del buque. A continuación se muestran dos figuras a modo de aclaración:

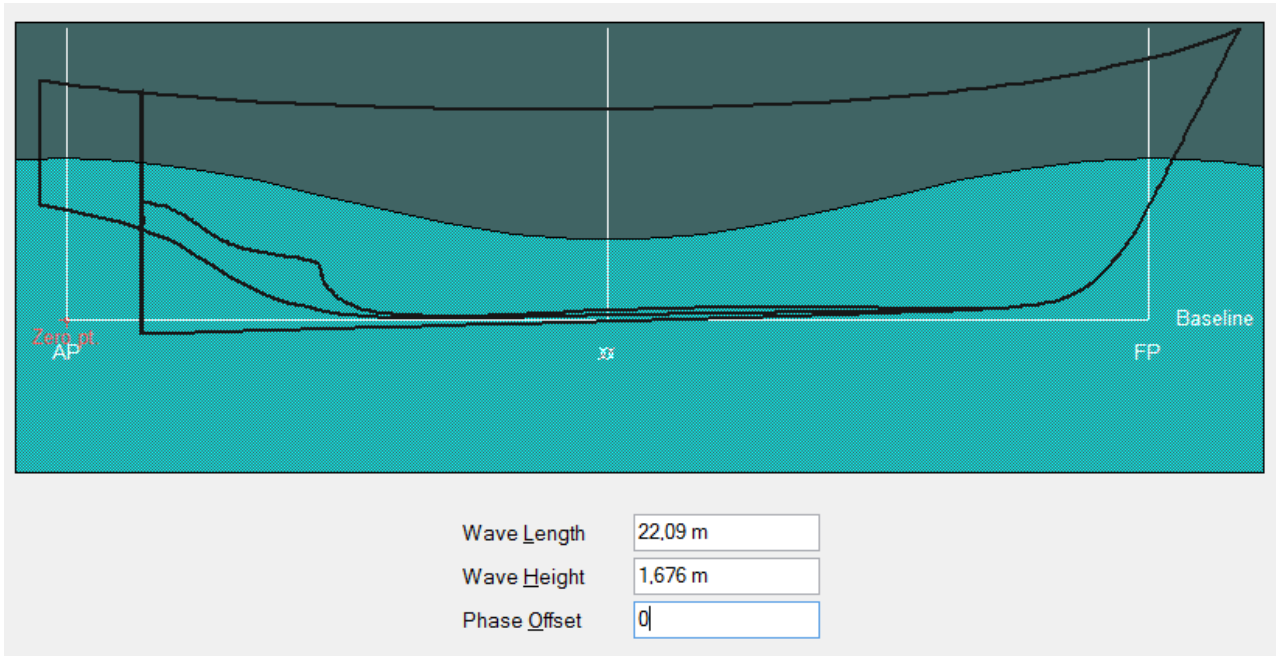


Figura 3.11 Ola generada con "phase offset" en 0

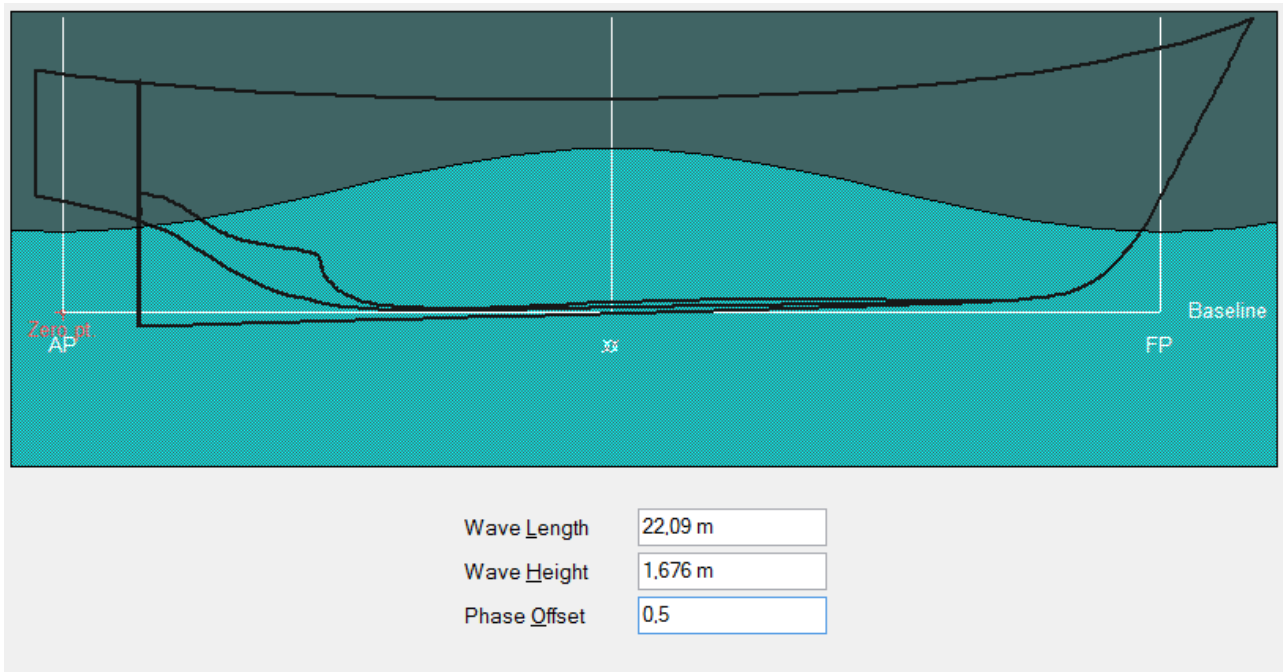


Figura 3.12 Ola generada con “phase offset” en 0

Este programa, ejecutado en solitario, tiene un inconveniente a la hora de ser utilizado para análisis que requieran de una gran cantidad de iteraciones.

Si es necesario calcular dos valores para cada una de las frecuencias, y se ha considerado utilizar un total de 41 frecuencias con seis pendientes diferentes, se tendrían que realizar 246 cálculos con el programa. Cada uno de estos cálculos conllevaría introducir las características de la ola definida, realizar el análisis, extraer los valores correspondientes a los GM obtenidos y realizar la media y la suma de máximo y mínimo de los valores. Se trata de un trabajo mecánico que llevaría una gran cantidad de tiempo, por no mencionar que, en caso de querer variar las frecuencias o cambiar alguna de las condiciones habría que realizar los cálculos de nuevo.

Por todos estos inconvenientes, se ha automatizado el proceso mediante Visual Basic para aplicaciones. Visual Basic es un código que permite definir pequeños paquetes de trabajo llamados “objetos”, con los que se pueden llamar a campos de escritura o modificables dentro de una infinidad de programas. Maxsurf Stability Design incluye en su paquete de instalación una cantidad de objetos definidos necesarios para automatizar una gran cantidad de cálculos de este tipo.

El proceso sería el siguiente:

- Por medio de una hoja de Microsoft Excel, el usuario y el programa se comunican.
- Detrás de Microsoft Excel estaría Visual Basic, donde se programarían los comandos y las llamadas a objetos pertinentes para realizar las operaciones deseadas.
- Maxsurf Stability Design introduciría los valores que se encuentran en la hoja o realizaría análisis según las indicaciones de Visual Basic.

- Posteriormente, se reportarían los datos de Maxsurf hasta la hoja de cálculo, pudiendo extraerlos en formato tabla.

Una vez realizada la automatización y la obtención de datos, sólo sería necesario obtener la media de los valores y la diferencia entre máximos y mínimos, obteniendo de forma mucho más fácil todos los valores referentes a estabilidad en cada una de las condiciones establecidas.

Visual Basic tiene una interfaz tipo consola en la que se establecerían las órdenes necesarias para realizar las operaciones. Para realizar la automatización de este cálculo, al inicio de los comandos se han introducido características básicas utilizadas (como puede ser el cambio de análisis predefinido o la suposición de ola sinusoidal). De esta manera, cuando se introduce el comando "*hydromaxApp.Design.ActiveAnalysisMode = hmAMEquilibrium*", en el Maxsurf Stability Design, el análisis activo pasa a ser el correspondiente a análisis de equilibrio.

Lo mismo pasaría con la consideración de ola. Cuando Visual Basic lee "*hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveForm = hmWFSinusoidal*", introduce la consideración de olas sinusoidales en la definición de olas.

Para hacerle entender al programa las variables a utilizar, primero se han de definir al inicio del script. Existen varias maneras de definir las variables, dependiendo de cuantos números han de contemplar. "Double" sería la definición que contemplaría un rango de números más alto (tanto decimales como números enteros). "Long" y "String" son definiciones con muchos menos números, utilizadas para variables acotadas en las que se sabe su resultado (como podría ser por ejemplo los valores necesarios para las iteraciones). En esta automatización se han considerado estos tres tipos dependiendo de la variable a definir. A continuación se pueden ver los valores necesarios para la automatización:

```
Dim FrecuencyStart As Double
Dim FrecuencyFinish As Double
Dim FrecuencyInterval As Double
Dim Slope1 As Double
Dim Slope2 As Double
Dim Slope3 As Double
Dim Slope4 As Double
Dim Slope5 As Double
Dim Slope6 As Double
Dim FrecuencyIterator As Long
Dim SlopeIterator As Long
Dim iterator1 As Long
Dim iterator2 As Long
Dim WaveLenght As Double
Dim Analysistext1 As String
Dim Analysistext2 As String
Dim GMResult As Double
Dim rowOffset As Long
Dim columnOffset As Long
```

Figura 3.13 Valores definidos en Visual Basic

Para obtener una automatización más versátil, tanto los datos de frecuencia de olas con las que se haría el análisis como las pendientes de ola deberían de ser introducidos fuera de la consola, para tener una interfaz mucho más intuitiva. En este caso, se ha optado por que fuesen introducidos en la hoja de Microsoft Excel.

De esta manera, los datos se expondrían en la siguiente tabla. Visual Basic utilizará los valores de la tabla para hacer los cálculos. Se ha estipulado un lugar para pendientes de ola y otro para frecuencias. En la parte de frecuencias, como se consideran una gran cantidad, se indican en forma de intervalo, con un paso definido:

Frecuencys			Slope	
Frecuency Start	0,4	m	Slope 1	0,005
Frecuency Finshi	2,4	m	Slope 2	0,01
Intervals	0,05	-	Slope 3	0,02
			Slope 4	0,033333
			Slope 5	0,05
			Slope 6	0,066667

Y, en la parte de automatización, para que Visual Basic introduzca los valores de la tabla:

```

FrecuencyStart = Range("info!b18")
FrecuencyFinish = Range("info!b19")
FrecuencyInterval = Range("info!b20")
Slope1 = Range("info!e18")
Slope2 = Range("info!e19")
Slope3 = Range("info!e20")
Slope4 = Range("info!e21")
Slope5 = Range("info!e22")
Slope6 = Range("info!e23")
FrecuencyIterator = Range("info!g18")
SlopeIterator = Range("info!g19")
    
```

Figura 3.14 Valores de tabla en Visual Basic

En este momento, con las variables necesarias introducidas en Visual Basic, comenzaría la parte de la operación automatizada. Dentro de la definición de la ola en Maxsurf Stability Design, sólo se puede actuar en tres parámetros. Uno sería la longitud de ola, el otro la altura de ola, y el tercero la posición de la cresta de la ola a lo largo de la eslora del buque.

Para el cálculo del GM, será necesario realizar los análisis con la cresta de la ola en todas las posiciones de la eslora, para obtener los valores máximos y mínimos. Por lo tanto, sólo se actuará en los dos primeros valores. El primero de los valores se definirá en función

de las frecuencias introducidas. En cuanto a la altura de ola, serán las pendientes las que definan este valor.

Dentro de Visual Basic, por tanto, habría que introducir las relaciones ya definidas anteriormente, que serían:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot g}{\omega_w^2} \quad [22]$$

$$H = S_w \cdot \lambda \quad [23]$$

Con estas dos relaciones, se estará introduciendo las características de la ola en la operación. Tan sólo faltaría introducir las operaciones iterativas en el programa para que realizase el cálculo con todos los datos que interesan (con todas las frecuencias y todas las pendientes de ola introducidas). El script generado por Visual Basic será adjuntado al presente trabajo, en el Anexo 1.

Para poder manejar los datos posteriormente, será necesario introducir dentro del script una salida de datos. En este caso se ha optado por reportar los datos en una nueva hoja de Excel donde se recojan todos los valores a analizar. De esta manera, Visual Basic generará tablas de datos que se manipularán posteriormente para obtener GM_0 y GM_a . Para ilustrar este paso, a continuación se puede ver un fragmento de una de las tablas con los valores de una pendiente concreta (la primera):

Resultados para: Pendiente	Resultados para: Per	Resultados	Resultados para:	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
GMt	GMt	GMt	GMt	GMt	GMt	GMt	GMt	GMt	GMt
0,367741652	0,367512862	0,36664	0,366379348	0,366087	0,365714	0,365448	0,365326	0,365419	0,365772
0,366408487	0,365890726	0,365305	0,364697956	0,364071	0,363449	0,362873	0,362384	0,362038	0,361898
0,364700498	0,364263122	0,363711	0,363072395	0,362365	0,361667	0,360901	0,360153	0,359471	0,358911
0,363767641	0,362903914	0,362485	0,361967478	0,361276	0,360483	0,359609	0,358685	0,357763	0,356873
0,363161009	0,36275806	0,361876	0,361441307	0,360832	0,36007	0,359171	0,358167	0,357077	0,355939
0,363246138	0,362948036	0,362582	0,361692637	0,36121	0,360538	0,359686	0,358663	0,357505	0,356215
0,364021196	0,363850556	0,363632	0,363282177	0,36243	0,361942	0,361197	0,360245	0,359084	0,357744
0,365405302	0,365390808	0,365339	0,364748743	0,364592	0,364207	0,363617	0,362795	0,361788	0,360485
0,367268702	0,367418741	0,367235	0,367414823	0,367427	0,36726	0,366888	0,36628	0,36542	0,364251
0,369183767	0,36967895	0,370089	0,370401978	0,370612	0,370689	0,370595	0,370286	0,369719	0,368851
0,371405668	0,371866593	0,372346	0,372821693	0,373745	0,374092	0,374316	0,374366	0,374185	0,373716
0,37329876	0,373845676	0,374446	0,375085287	0,37575	0,376375	0,376966	0,377454	0,377776	0,378352
0,374749811	0,375321632	0,375981	0,376742037	0,377554	0,378414	0,37929	0,380141	0,380907	0,381504
0,375797019	0,376556072	0,376854	0,37761615	0,378494	0,379479	0,380573	0,381706	0,382847	0,38393
0,376232829	0,376351491	0,377136	0,377991177	0,37896	0,379531	0,380684	0,381975	0,383387	0,384843
0,375678515	0,376155156	0,376223	0,376957619	0,377817	0,378851	0,380057	0,381456	0,382495	0,384159
0,374852406	0,375000986	0,375281	0,375327514	0,37598	0,376805	0,377836	0,37911	0,380646	0,382423
0,37360595	0,373557663	0,373568	0,37330446	0,373666	0,374219	0,374967	0,375969	0,377265	0,378875
0,372043492	0,371802071	0,371606	0,371080258	0,371154	0,371366	0,371767	0,372406	0,373325	0,374605
0,370244325	0,369862838	0,369109	0,36882557	0,368809	0,368495	0,368532	0,368772	0,369276	0,370094

Figura 3.15 Fragmento de resultados que reporta Visual Basic

Ahora, para cada una de las frecuencias, existen 20 valores de GM (valores obtenidos a medida que pasa la ola). Para generar la matriz a introducir en el modelo matemático habrá que obtener la media de todos los valores de cada columna y la diferencia del máximo y el mínimo de las columnas (obteniendo de esta manera GM_0 y GM_a , respectivamente). Se adjuntarán algunas de las tablas como anexo a este trabajo, mostradas en el Anexo 2.

Con los datos introducidos en el modelo matemático simplificado se obtiene un modelo matemático de un grado y medio de libertad, considerando estos valores de forma cuasiestática. Nótese que en el modelo matemático se introducirán más frecuencias de las que se han detallado anteriormente. Para obtener los valores de GM_0 y GM_a de estas nuevas frecuencias se recurrirá a la interpolación entre datos.

Existe una manera sencilla de realizar una nueva matriz expandida (con los valores interpolados introducidos en la matriz) en el Matlab mediante el comando "interp2". Basta introducir los datos de las dimensiones de la matriz inicial, la matriz inicial y las nuevas dimensiones de la matriz interpolada. Matlab realizará una interpolación en las columnas donde no exista dato real. Al tratarse de una interpolación entre datos muy parecidos, los resultados obtenidos serán muy exactos.

De esta manera, en vez de realizar un cálculo con 41 frecuencias se realizará el cálculo con 201 frecuencias (se reducirá el paso de 0,05 a 0,01).

3.1.1.2 Obtención de los valores I_{xx} y A_{44}

La obtención del valor de inercia y de inercia de masa añadida se puede calcular de forma sencilla. Primero se comenzará con el cálculo de inercia de masa añadida. Para obtener este valor, se utilizará el programa Amarcón Octopus Office.

Este programa de cálculo se basa directamente en la teoría de las rebanadas, ampliamente utilizada en computación de cálculos para la obtención de datos como los coeficientes de amortiguamiento o la masa añadida. Se utiliza también para la obtención de funciones de respuesta del buque (RAOs). Esta teoría parte del análisis del buque que se quiere analizar en rebanadas del mismo. Estas rebanadas se consideran infinitas en su longitud, siendo un prisma infinito de una forma en concreto, dependiendo de qué sección se esté analizando. Cada una de las secciones que se considera tiene asociadas unas propiedades hidrodinámicas locales, que contribuyen al total [23].

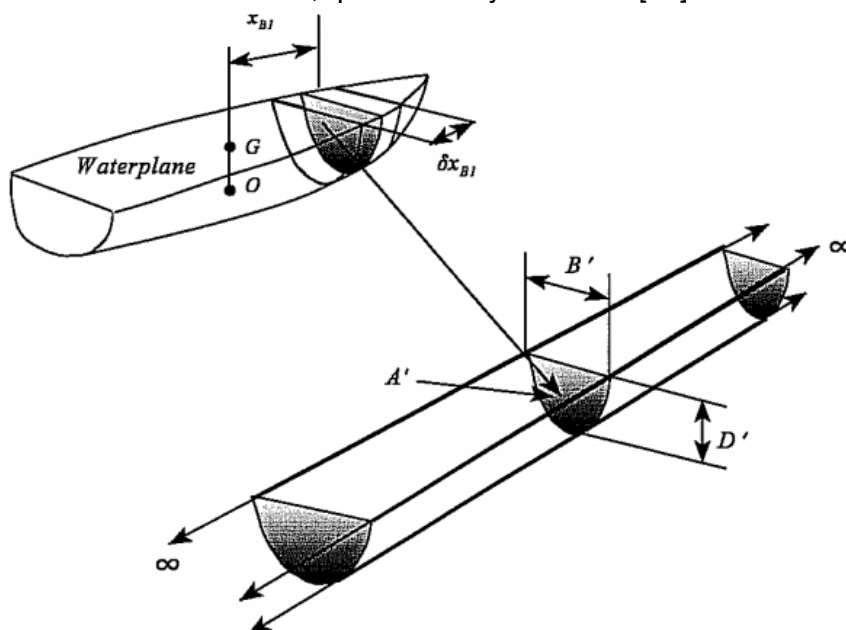


Figura 3.16 Representación de la teoría de las rebanadas [23]

Mediante cálculo matemático se analizan los diversos grados de libertad (existen grados que no puede calcular, como podría ser avance, debido a su infinitud). Los resultados posteriormente se comparan con unas formas de buque tipo constatadas por Lewis, que pueden ser extrapoladas a los resultados ya conocidos de un prisma cilíndrico de longitud infinita.

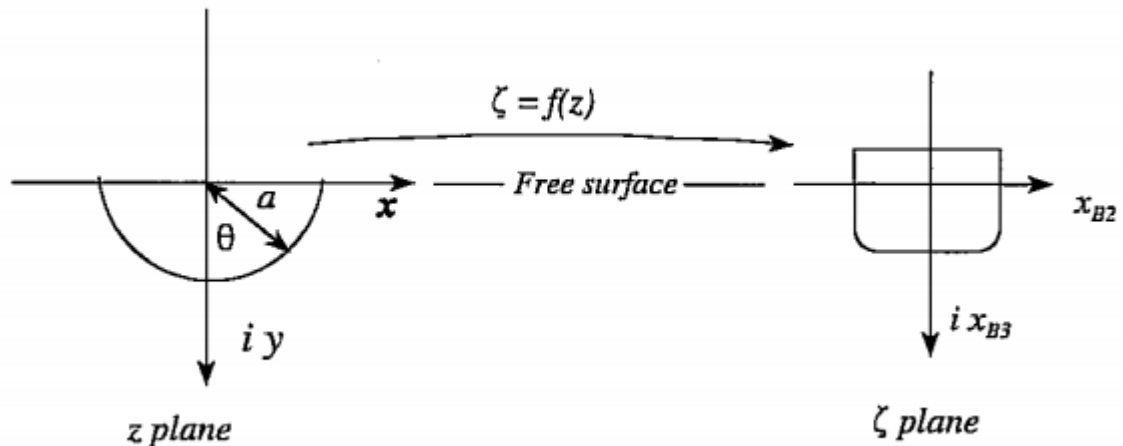


Figura 3.17 Representación de cambio de cilindro a formas de Lewis [23]

De esta manera, Amarcón Octopus Office consigue obtener los datos necesarios para solucionar la ecuación de movimiento. Se describirá de forma detallada la obtención del dato de masa añadida.

El programa, para obtener todos los datos referentes a las formas del buque en cuestión necesita una representación de la misma en un formato que pueda leer y las condiciones del análisis (que serán calado del buque, velocidades y frecuencias de ola). Para la introducción de las formas dentro del programa, se ha de realizar una cartilla de trazado dentro de la opción "2D Hull Scaler". El programa generará un archivo de lectura para la modificación de los datos.

Nótese que el proceso para la introducción de la cartilla de trazado dentro del programa es engorroso y normalmente da lugar a problemas y editados en el propio archivo de texto que genera, sin utilizar la interfaz que el programa tiene. Esto se debe a las confusiones generadas entre lo que el programa muestra en pantalla y lo que realmente computa, que en algunos casos no se corresponde. Se introducirá en un anexo un fragmento del archivo correspondiente al archivo de lectura de la cartilla de trazado del buque (Anexo 3).

Una vez introducidos todos los datos de la cartilla de trazado, generando una cantidad de secciones (en este caso, 41 secciones con un intervalo de separación de 0,615 metros) se obtienen las siguientes formas:

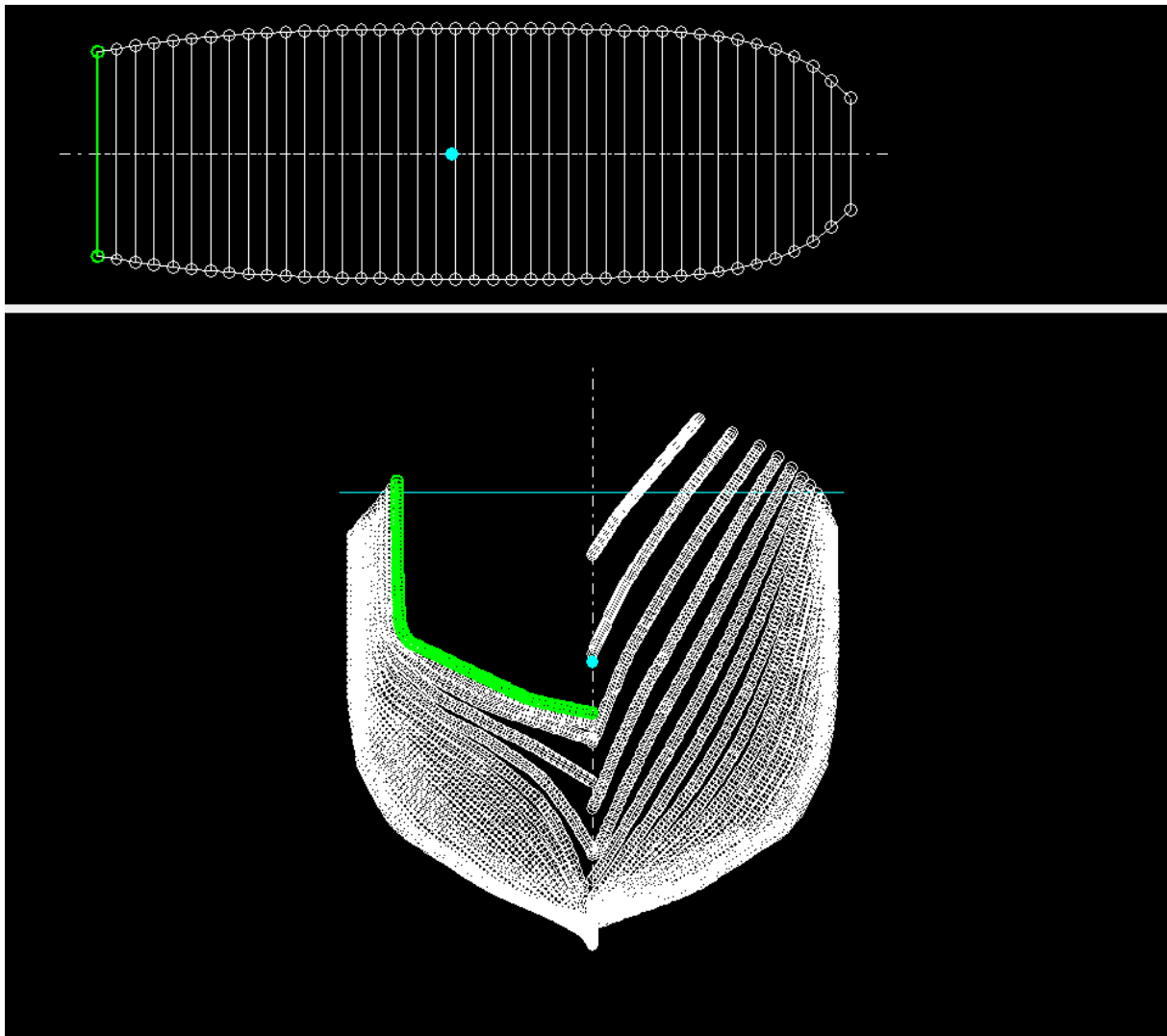


Figura 3.18 Formas extraídas de Amarcón Octopus Office

Una vez generada la cartilla de trazado, habrá que utilizar la herramienta “3D Hull Mesher”. Esta herramienta generará a partir de la cartilla de trazado anteriormente introducida una malla de puntos tridimensional que utilizará el programa para generar las formas del buque. Para ello, se abrirá en la herramienta las formas del buque anteriormente mencionadas y se generará la malla. Hay que introducir los datos de puntal a proa y a popa, valores que, con que sean más grandes que el puntal real, generará la malla del modelo en su totalidad[24].

El programa consta de una pequeña ventana en la que se puede ver el resultado del mallado de la operación anterior. De esta manera, generando 100 secciones por cada una de las dimensiones, se obtiene una representación de la malla como sigue:

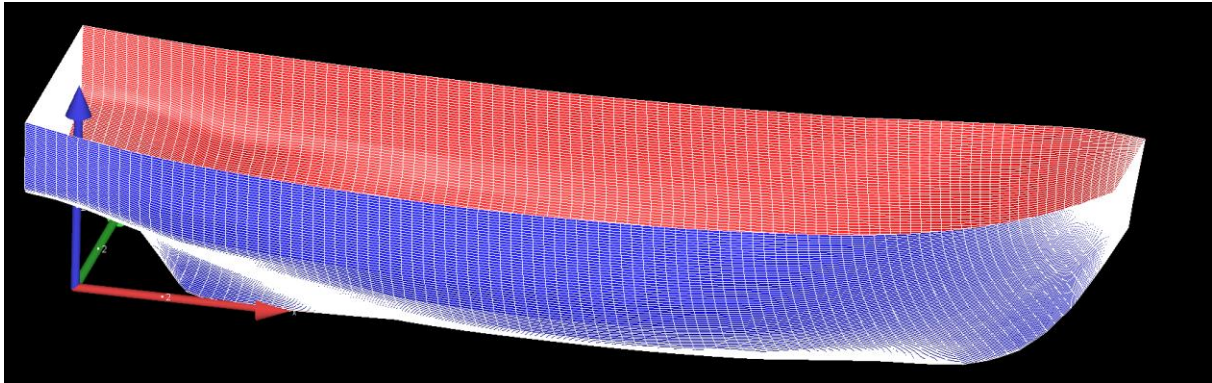


Figura 3.19 Malla generada en Amarcon Octopus Office

Una vez generado la cartilla de trazado y la malla, se puede generar un archivo para el cálculo de los datos. En el programa, mediante “Create 2D CHBD”, se genera el mismo. Dentro de este archivo se han de especificar los dos documentos anteriormente generados, además de algunas de las características del análisis. Entre ellas se encuentra los calados a calcular, las velocidades, las frecuencias de ola y la teoría a calcular[24].

En este caso, como se ha explicado anteriormente, se utilizarán las formas hidrodinámicas de Lewis. En cuanto a los calados y velocidades, se han utilizado unos datos tipo que tienen en cuenta los utilizados en los anteriores análisis. Para las frecuencias de ola, sólo será necesaria la frecuencia de resonancia del buque. Se utilizará el intervalo de frecuencias del modelo matemático para generar la gráfica.

Ahora que el archivo de cálculo ya se ha generado, tan sólo faltaría ejecutarlo para obtener el análisis de las formas. Para ello, habrá que crear un nuevo proyecto dentro de Amarcon Octopus Office e indicar el archivo generado anteriormente. En este momento se obtienen resultados dinámicos de las formas[24].

En los resultados se pueden observar una gran cantidad de datos, entre los que están el modelado de fuerzas de la ola, términos lineales de amortiguamiento y términos de masa añadida. El valor de masa añadida que se busca es el correspondiente a la frecuencia natural del grado de libertad de balance (A_{44}) Se encuentra una gráfica para cada uno de los calados y velocidades. Dado que se está realizando un modelo a velocidad 0 y calado determinado, se encuentra la siguiente gráfica:

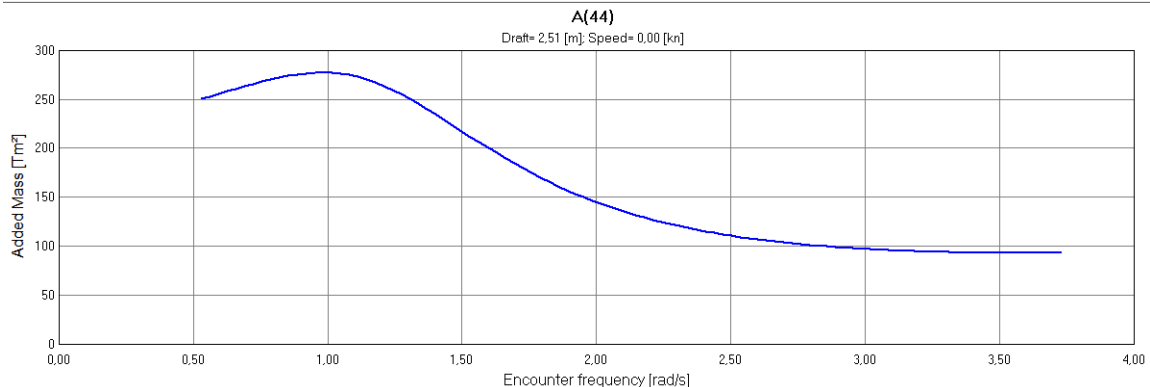


Figura 3.20 Valore de A_{44} extraídos de Amarcon Octopus Office

La gráfica muestra los valores de masa añadida reportados por Amarcon Octopus Office. Este tipo de software reporta los valores con la superficie del agua como referencia. Es necesario obtener el valor con en centro de gravedad como referencia. Para obtener este valor, se ha de realizar el traspaso de la superficie al centro de gravedad, tal y como se explica en el texto [23]:

$$A_{44} = a_{44} - \overline{OG} \cdot a_{42} - \overline{OG} \cdot a_{24} + \overline{OG}^2 \cdot a_{22} \quad [24]$$

En la ecuación anterior el valor “OG” corresponde a la distancia que existe entre la superficie del agua y el centro de gravedad del buque, que sería la altura del centro de gravedad menos el calado del buque. Este valor se extraerá de la prueba de estabilidad explicada más adelante, en el punto 3.2.1. Esta distancia, en este caso, será:

$$\overline{OG} = 3,263 - 2,507 = 0,756 \text{ m} \quad [25]$$

La frecuencia natural, extraída de experiencias que serán posteriormente explicadas, será de 0,941. Con todos los datos mostrados y las tablas de encuentro de los valores de masa añadida ya es posible el cálculo de la inercia de masa añadida. Este cálculo será:

$$A_{44} = 276,9389 - 0,756 \cdot (-174,94) - 0,756 \cdot (-174,94) + 0,756^2 \cdot 167,2163$$
$$A_{44} = 637,10 \text{ t m}^2$$

Una vez realizado el cálculo, se puede incorporar el valor de masa añadida al modelo matemático. Los valores de las gráficas necesarios serán adjuntados en un anexo posterior (Anexo 4).

El valor de inercia del buque puede ser calculado con una simple relación entre inercias, el término C_{44} y la frecuencia natural. Mediante diversas experiencias, que serán explicadas a continuación, se han determinado los diversos valores necesarios para obtener la inercia de la siguiente expresión:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\Delta \cdot GM}{I_{xx} + A_{44}}} \quad [26]$$

Por lo tanto, para obtener la inercia se han de conocer los valores de inercia de masa añadida, desplazamiento, altura metacéntrica y frecuencia natural. Los valores que componen el numerador pueden ser obtenidos del Maxsurf Stability Design. El valor A_{44} ha sido calculado anteriormente. Para la frecuencia natural, se ha de recurrir a un ensayo de decaimiento, prueba que se explicará posteriormente. La frecuencia natural será 0,941 rad/s.

El valor de inercia será el siguiente:

$$I_{xx} = \frac{\Delta \cdot GM}{\omega_n^2} - A_{44} \quad [27]$$

$$I_{xx} = \frac{184,984 \cdot 9,81 \cdot 0,446}{0,941^2} - 637,10 = 276,9265 \text{ t m}^2$$

Este valor, si se compara con el valor de inercia de masa añadida, es un valor poco significativo. Se trata de un valor menor al normalmente obtenido a la hora de calcular valores de inercia. Esto puede ser debido a la concentración de pesos en la línea de crujía. Al concentrarse los pesos en esa zona, la inercia se ve disminuida. También existe la posibilidad de que haya un error en el cálculo de masa añadida, al ser calculado con el programa Amarcon Octopus Office.

Cabe destacar que, a pesar de que este valor es mucho menor al esperado, ha sido calculado con datos extraídos de experiencias tanto en ensayos en canal como matemáticas, obteniendo valores veraces. El valor real a tener en cuenta sería el de la suma de inercias ($I_{xx} + A_{44}$) que sería 914,0265 t m². Este valor ha sido obtenido de la ecuación [26], donde los valores correspondientes a frecuencia natural, GM y desplazamiento se concretan en la parte experimental.

3.1.1.3 Obtención de los valores B_{44a} y B_{44b}

Estos valores se pueden obtener mediante software como el anterior mencionado. Amarcon Octopus Office es capaz de generar una gráfica para mostrar los valores de amortiguamiento que se obtienen de las iteraciones que realiza con las formas. Aun así, existe el problema del segundo término, el amortiguamiento cuadrático. Este software no es capaz de obtener un amortiguamiento cuadrático, por lo que, si solo se considerase el valor lineal, el amortiguamiento quedaría mermado y los resultados obtenidos con los modelos serán erróneos.

Para hacer coincidir los valores del modelo matemático con el físico, a fin de poder comparar ambos resultados, se ha optado por utilizar los valores similares a los del modelo físico, que se determinan mediante un ensayo de decaimiento. Este ensayo será explicado posteriormente. Los valores de amortiguamiento obtenidos son los siguientes:

$$B_{44b} = 516,22 \text{ (t} \cdot \text{m}^2\text{)/s}$$

$$B_{44a} = 6,8714 \text{ (t} \cdot \text{m}^2\text{)}$$

Para complementar en ensayo de decaimiento que se ha realizado con el modelo físico, se ha modificado el modelo matemático para que simule un ensayo de decaimiento. De esta manera, se pueden comparar los resultados obtenidos con ambos métodos.

Realizar un ensayo de decaimiento con el modelo matemático es sencillo. Se tendrá que modificar el modelo de tal manera que, en sus condiciones iniciales, comience con una escora similar a las producidas en el modelo físico. Introduciendo los valores de GZ en aguas tranquilas, el movimiento irá disipándose hasta llegar a cero. Si se escalan los tiempos de uno de los ensayos realizados con el modelo físico y se comparan, se obtiene la siguiente figura:

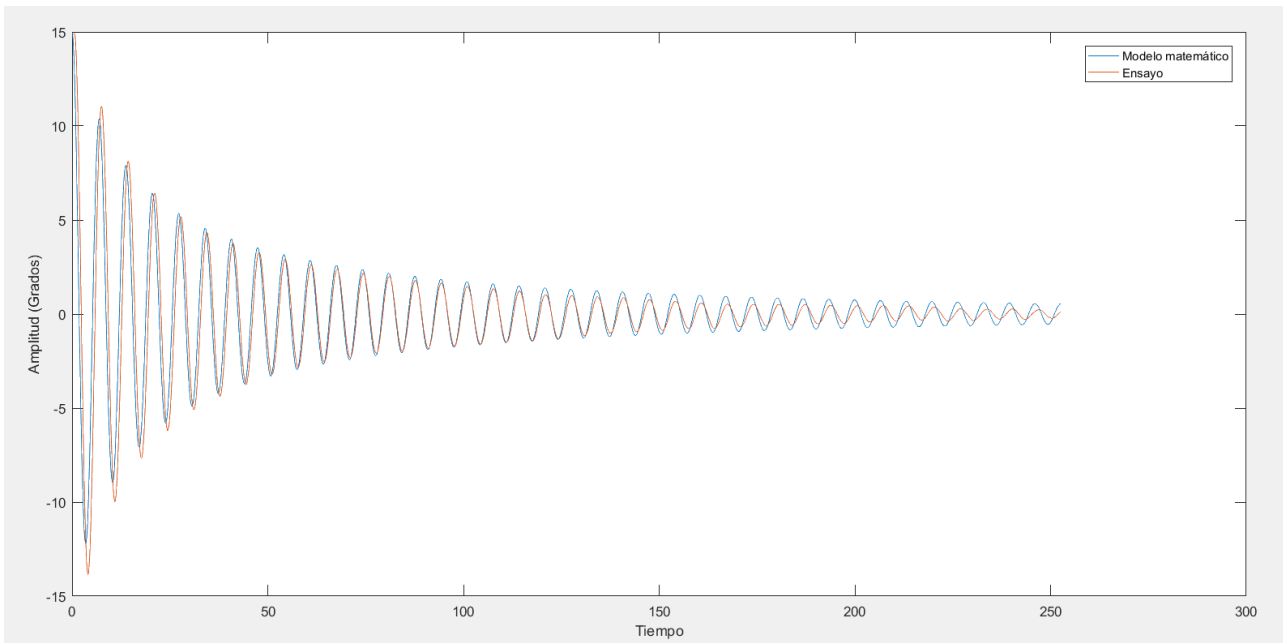


Figura 3.21 Representación de ensayo de decaimiento

La figura anterior (Figura 3.21) comprende los datos obtenidos con el modelo matemático y con el modelo físico. Existen pequeñas diferencias entre el ensayo matemático y físico, sobre todo en la zona final del ensayo, en la que se observan pequeños desajustes entre ambos modelos. El script para realizar el ensayo matemático se adjuntará en un anexo posterior (Anexo 5).

Prácticamente no existe desfase entre los máximos y los mínimos de ambos modelos, por lo que se considera que el modelo responde bien a la realidad. En cuanto a los datos a escoger, se introducirán los obtenidos en la experiencia con el modelo del buque, a fin de obtener valores más exactos.

A continuación se pueden ver otros ejemplos de pruebas de decaimiento de ambos modelos:

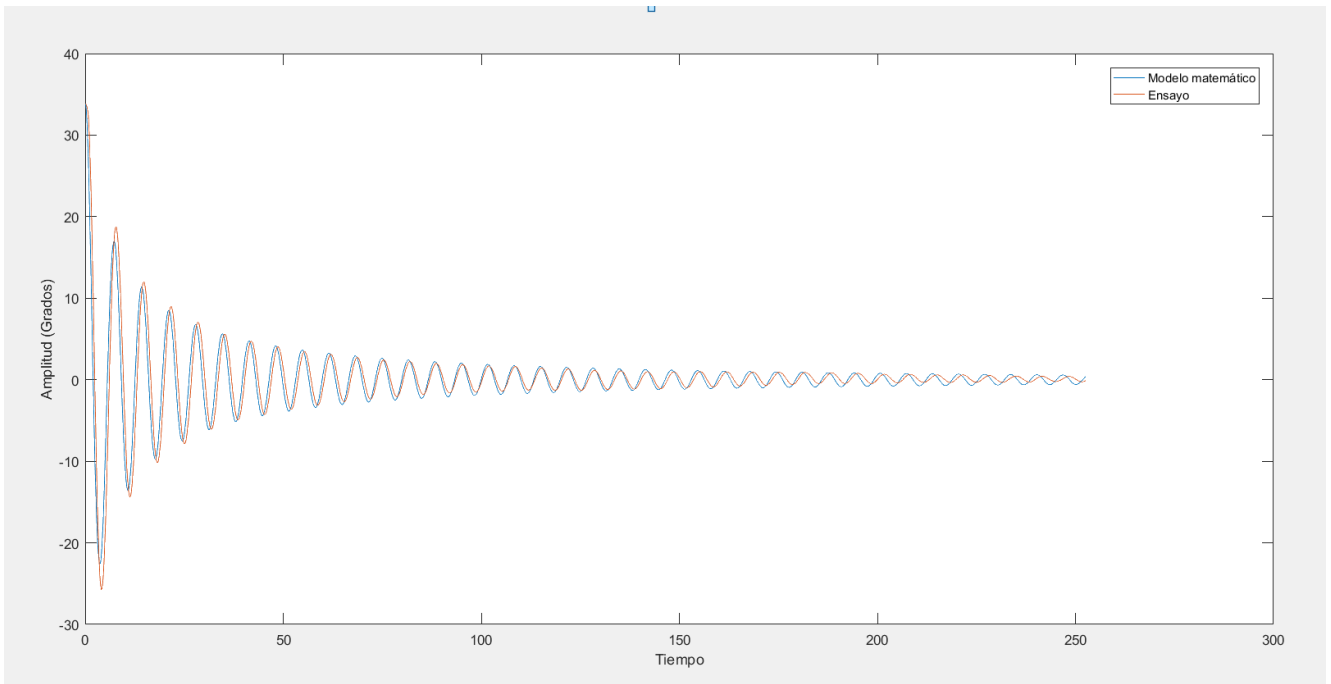


Figura 3.23 Ensayo de decaimiento 4

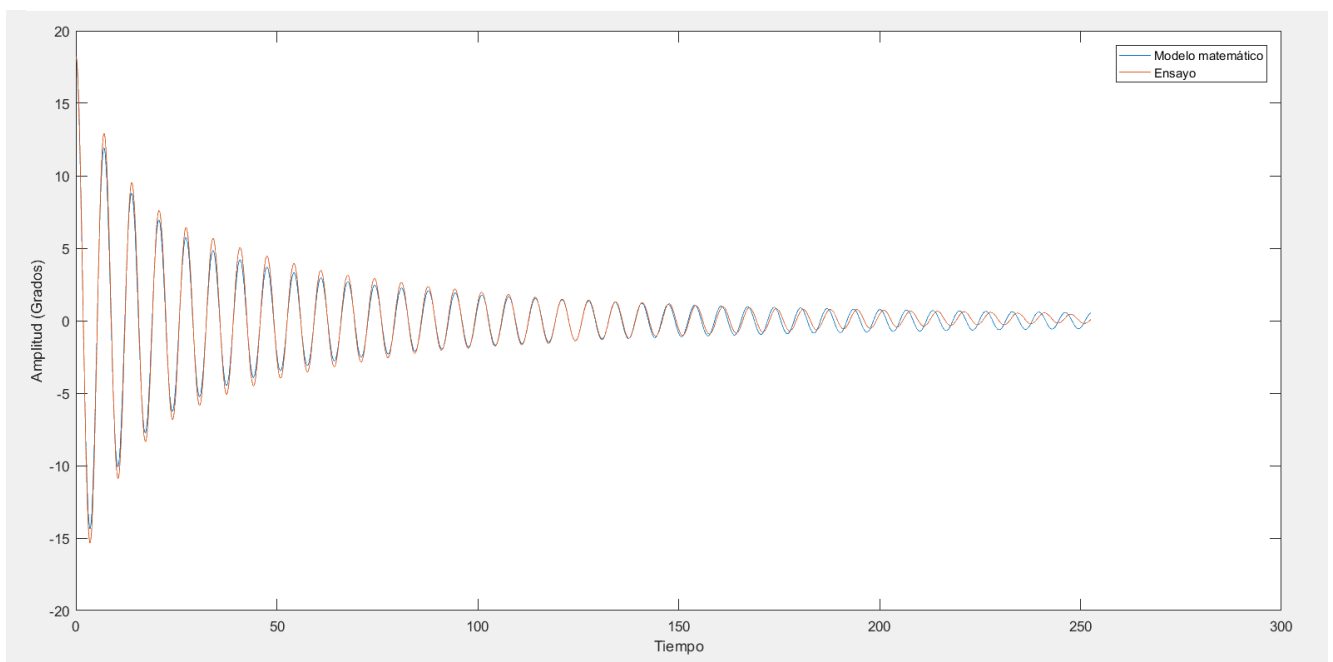


Figura 3.22 Ensayo de decaimiento 7

En cuanto a resultados, del modelo matemático se extrae una frecuencia natural de 0,945 rad/s, valor muy próximo al que se obtiene de forma física. Los valores de amortiguamiento lineal y cuadrático son ligeramente inferiores con respecto al ensayo físico, (para el primer ensayo, se produce un error menor del 0,5%, siendo el valor extraído de la experiencia de $458,34 \text{ t} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ y el del modelo matemático de $456,59 \text{ t} \cdot \text{m}^2/\text{s}$).

3.1.1.4 Resultados

Una vez obtenidos todos los datos necesarios para la realización del modelo matemático, como se indicaba en apartados anteriores, ya es posible generar resultados fiables en el modelo generado con Matlab. Como anteriormente, si se muestran algunas de las frecuencias de resonancia generadas en función del tiempo, teniendo en cuenta todos los datos introducidos, se obtienen las siguientes series temporales (sólo para una pendiente, $1/200$ y frecuencia de $1,89$ a $1,91$):

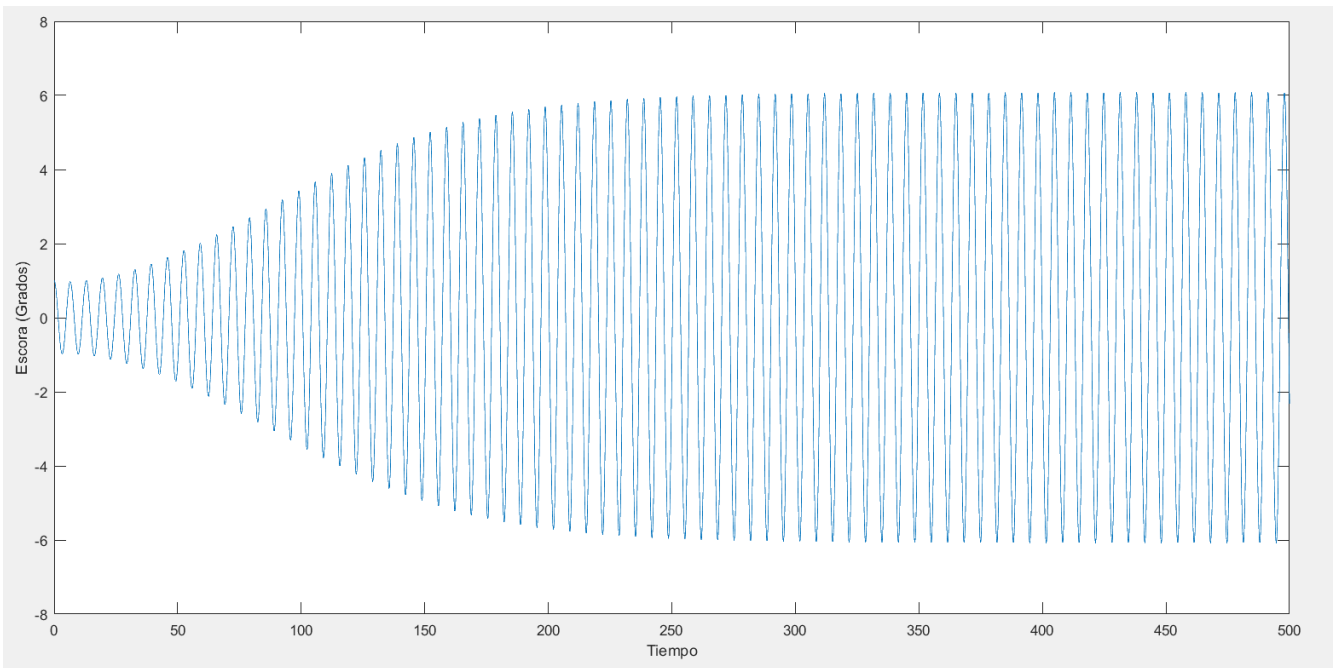


Figura 3.24 Escora modelada en pendiente $1/200$ para una frecuencia de $1,89$ rad/s

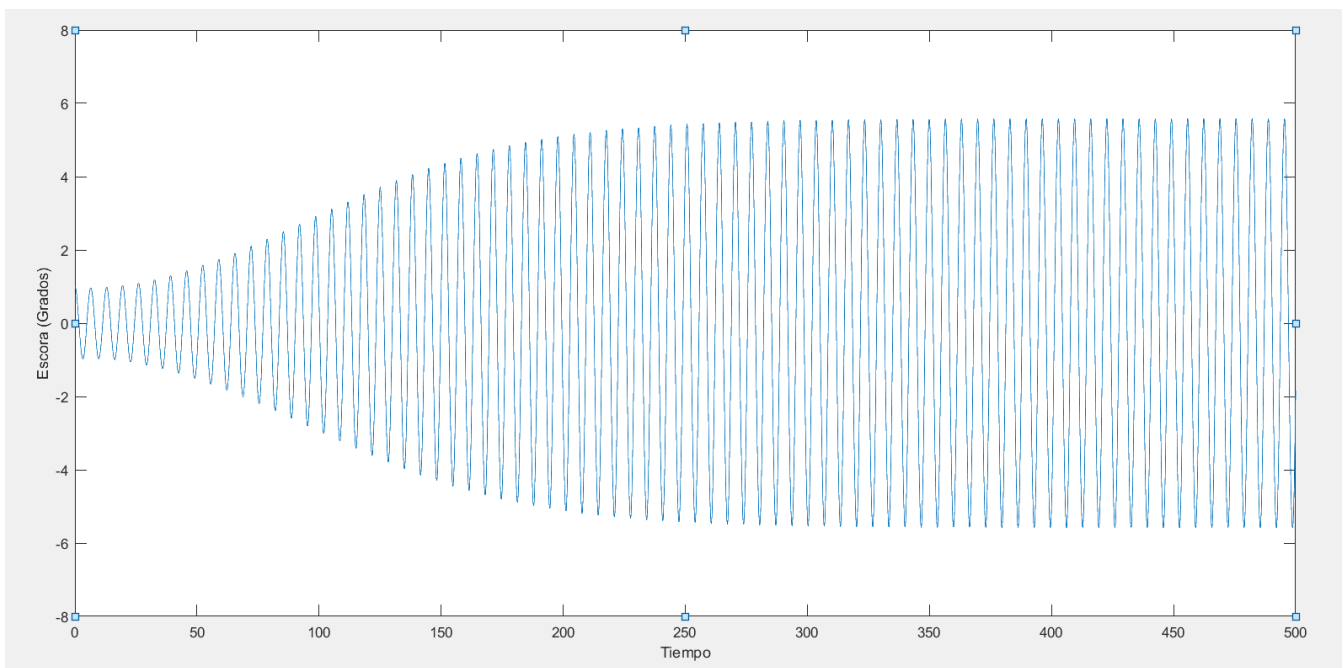


Figura 3.25 : Escora modelada en pendiente $1/200$ para una frecuencia de $1,90$ rad/s

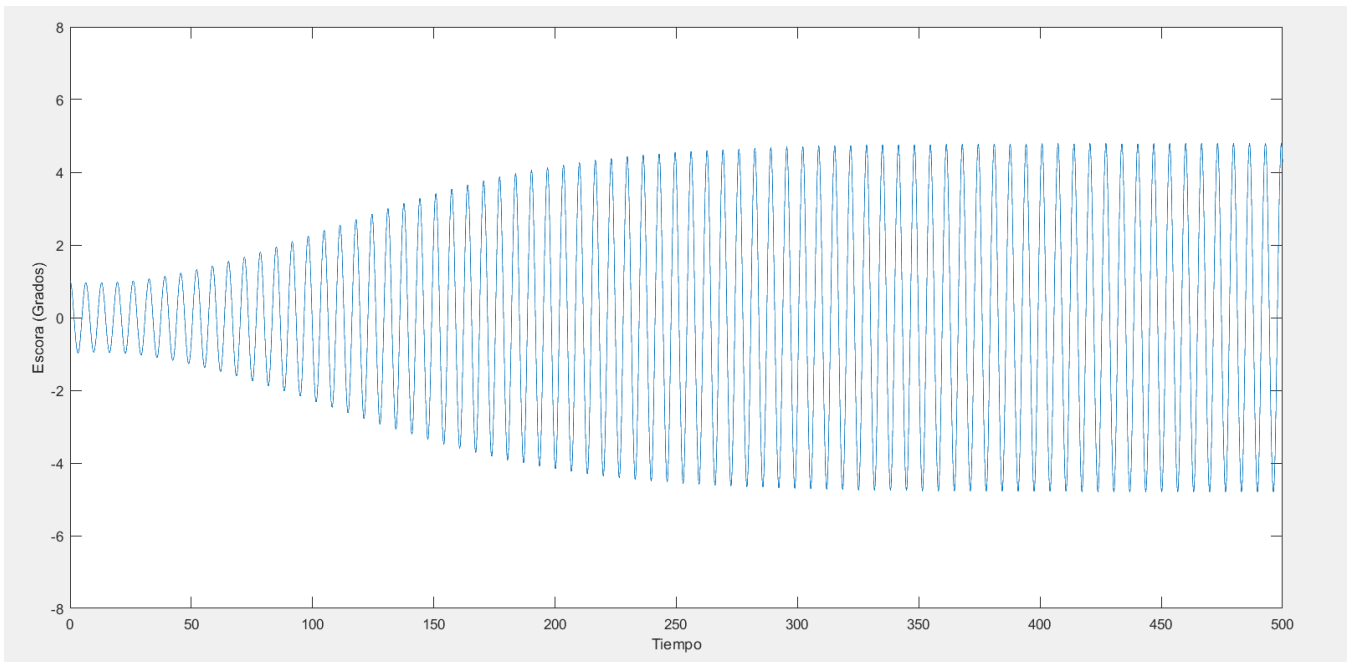


Figura 3.26 Escora modelada en pendiente 1/200 para una frecuencia de 1,91 rad/s

Las oscilaciones comienzan con un grado de amplitud. Si se produce resonancia, el ángulo aumenta en pocas oscilaciones, llegando a un límite que viene dado por el amortiguamiento. En este caso, se trata de una pendiente muy pequeña, por lo que los ángulos más grandes llegan a 6 grados.

Para otras pendientes, se puede ver el siguiente ejemplo, mostrando una pendiente 1/50 y una frecuencia de 1,89 a 1,91 frente al tiempo:

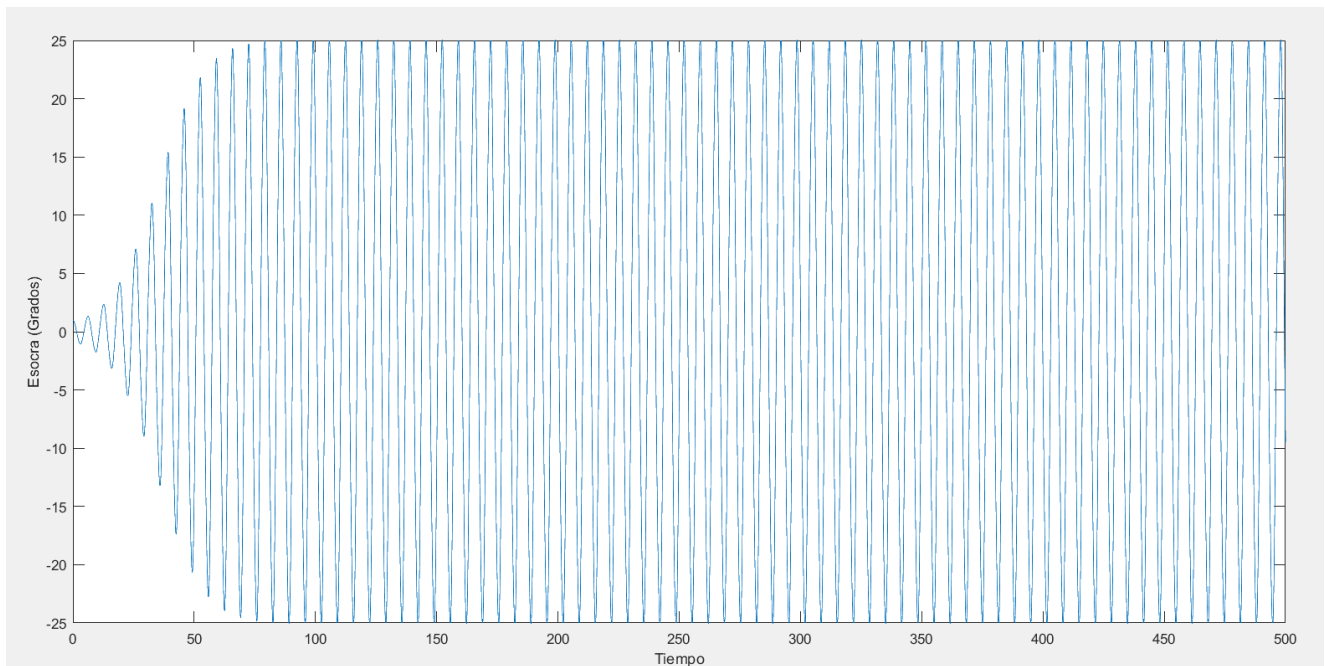


Figura 3.27 Escora modelada en pendiente 1/50 para una frecuencia de 1,89 rad/s

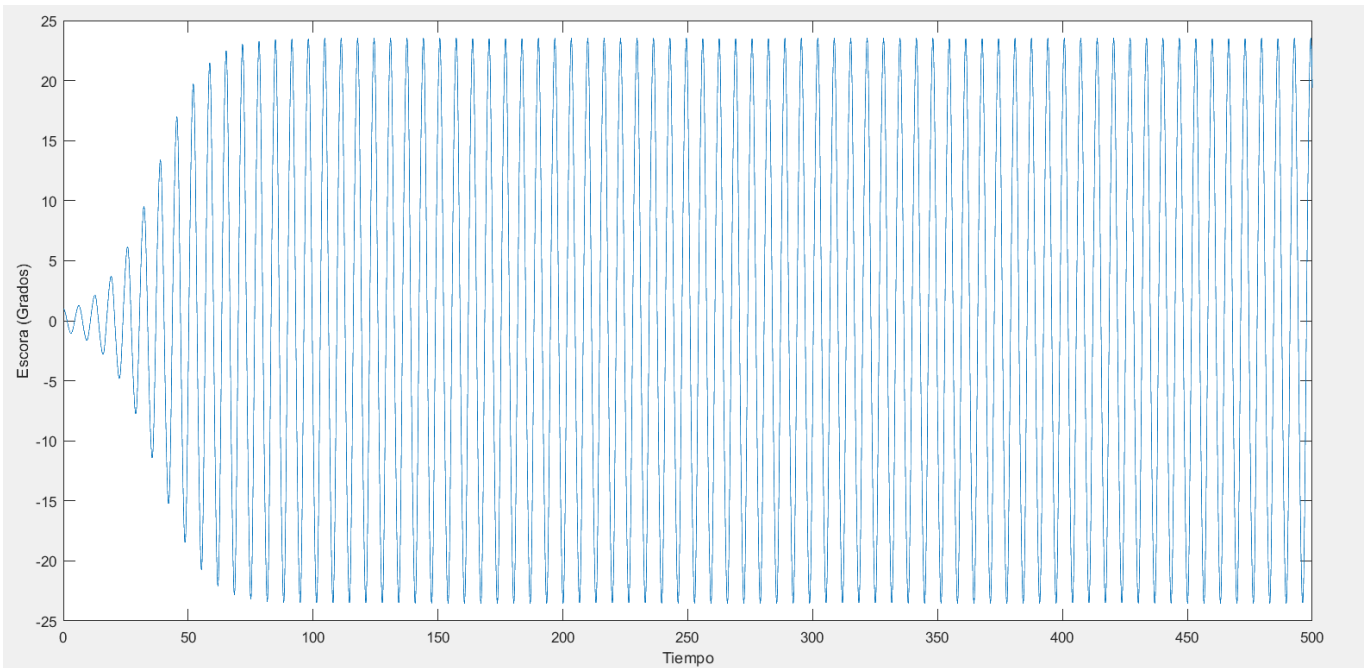


Figura 3.28 Escora modelada en pendiente 1/50 para una frecuencia de 1,90 rad/s

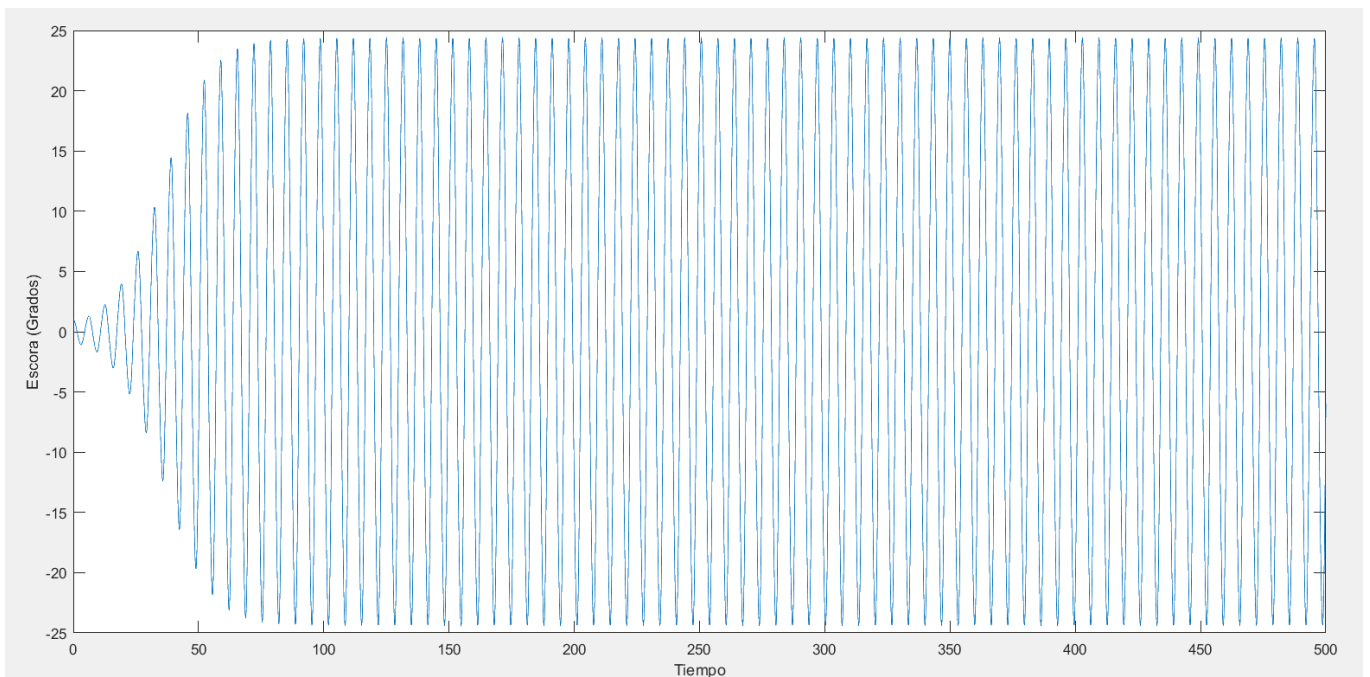


Figura 3.29 Escora modelada en pendiente 1/50 para una frecuencia de 1,91 rad/s

Como se puede observar en las gráficas anteriores, el aumento de la amplitud de balance para aquellas frecuencias en las que se produce resonancia es mucho más acusado. También se puede observar un ángulo máximo mayor, ya que se producen olas con alturas mayores.

Si se comparasen los valores máximos balance para las distintas frecuencias, se obtendrían los siguientes resultados (Para todas las pendientes):

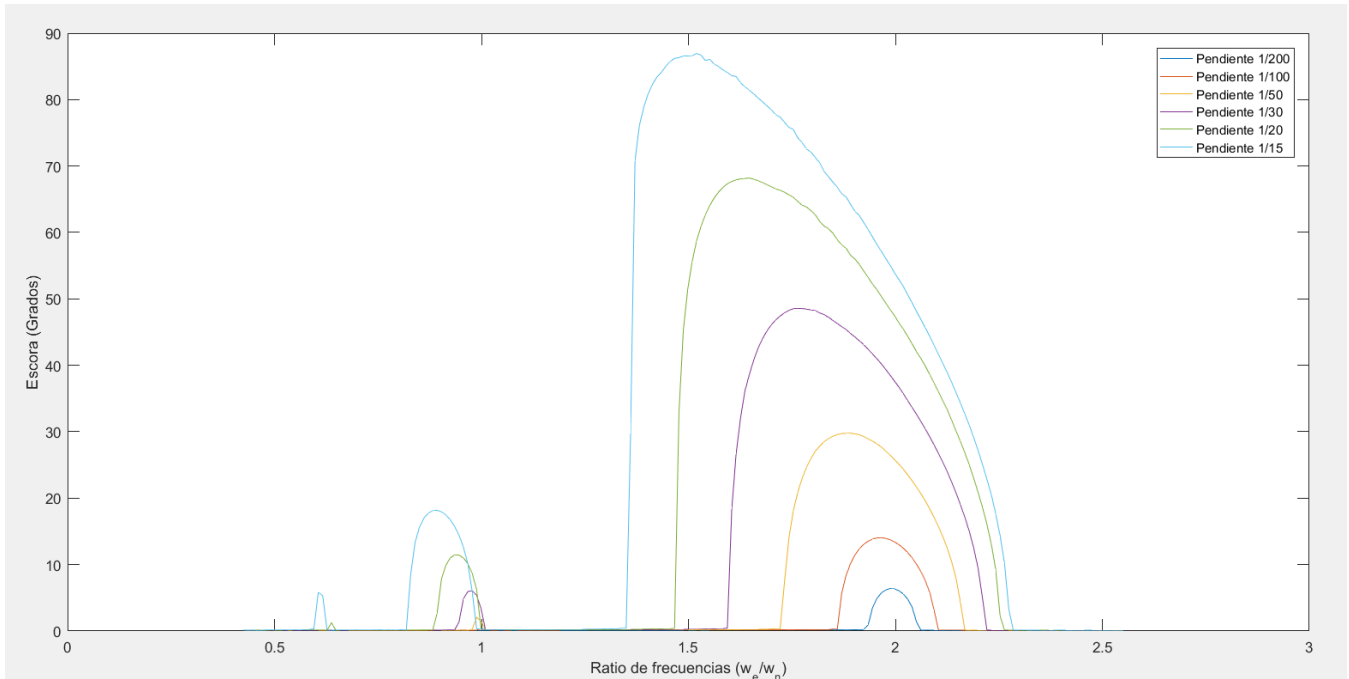


Figura 3.30 Frecuencias que generan resonancia a diversas pendientes en modelo de alturas metacéntricas

En la gráfica se pueden ver las áreas más típicas en las que se producen la resonancia. Como se había constatado inicialmente mediante la bibliografía consultada, los valores de frecuencia iguales a 2 veces la frecuencia natural del buque producen resonancia paramétrica. Esto se cumple para las pendientes más pequeñas. Sin embargo, a medida que aumenta la pendiente (alturas mayores de ola) la resonancia se produce a menor frecuencia.

Los datos observados en las pendientes más altas son debidos a la simplificación en la que incurre este modelo matemático. Al tratarse de un modelo que toma los valores de GM para obtener el valor del elemento recuperador (C_{44}), valor que perjudicará al buque en las zonas de resonancia, el aumento de escora en resonancia aumenta muy acusadamente. A medida que se aumenta la altura de las olas, más ayudará el elemento recuperador a acrecentar la resonancia, tan sólo limitado por el amortiguamiento.

Por ello, los datos obtenidos en las últimas pendientes son mucho mayores, llegando a perder fiabilidad (con ángulos de escora de hasta 80 grados).

Además, existe una razón particular por la que, a medida que aumentan las pendientes, mayor es la desviación hacia frecuencias más pequeñas. Este fenómeno se debe a la tipología de la curva de GZs, siendo en este caso de tipo “softening. Este término se refiere a cómo los valores de GM en olas se desarrollan a medida que aumenta el ángulo de escora.

Este proceso se puede observar en la referencia [25].

La razón de este fenómeno se debe al aumento o disminución de la frecuencia natural de forma dinámica. La frecuencia natural es proporcional al GM, por lo que aumentará o disminuirá si aumenta o disminuye el valor de GM, respectivamente. Este valor es función del GM medio en olas.

En cuanto a la zona anterior a la zona de resonancia, se trata de una resonancia residual debida a una segunda zona de inestabilidad. Si se vuelve a observar la gráfica referente a la ecuación amortiguada de Mathieu, se puede observar una zona de inestabilidad posterior a la zona de resonancia, que se produciría cuando p es igual a 1. Esta resonancia residual se produciría a la frecuencia natural (0,941 rad/s).

Nótese que en los modelos más exactos esta zona será mucho más pequeña, siendo prácticamente imposible su visualización en las experiencias con el modelo físico. Posteriormente a este modelo, con el modelo matemático de brazos adrizantes se observará una gran disminución de esta área de inestabilidad.

Las funciones en Matlab necesarias para obtener este modelo serán adjuntadas en un anexo, el Anexo 7.

3.1.2 Modelo matemático no lineal

El modelo matemático no lineal tiene diferencia con respecto al simplificado en la consideración de pequeños ángulos. En este modelo no se restringirá el movimiento, teniendo que utilizar por consiguiente los valores de brazos adrizantes en sustitución de las alturas metacéntricas.

En cuanto a los valores calculados en el apartado anterior, podrán ser utilizados para este mismo modelo, con la excepción anteriormente comentada. A continuación se realizará una explicación de cómo obtener los valores de brazos adrizantes.

3.1.2.1 Obtención de los valores de GZ

La obtención de los valores de GZ se realizará de una forma parecida a la obtención de los valores de alturas metacéntricas. Los programas a utilizar serán los mismos que se utilizaron en el cálculo de estos últimos, el Maxsurf Stability Design y el Visual Basic para aplicaciones.

Todo lo relacionado con las variables y con cómo interpreta Visual Basic las órdenes será igual que para el caso anterior. En este caso, con los mismos datos a introducir, se tendrá

que realizar un ensayo de estabilidad a grandes ángulos. El proceso sería el mismo que el anterior.

En diferencia al script anterior, éste ha de satisfacer las necesidades de grandes ángulos. En el análisis de grandes ángulos se obtienen valores para cada uno de los ángulos que Maxsurf Stability Design considera. Se consideran un total de 210 ángulos de escora, que van desde -30° hasta 180°. Un ejemplo del reporte de los datos obtenidos del programa podría ser el siguiente:

Heel to Starboard deg	-30,0	-20,0	-10,0	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	100,0	110,0	120,0	130,0	140,0	150,0	160,0	170,0	180,0
GZ m	-0,142	-0,105	-0,062	0,000	0,062	0,105	0,142	0,157	0,105	-0,011	-0,156	-0,310	-0,474	-0,637	-0,784	-0,899	-0,967	-0,970	-0,878	-0,658	-0,335	0,000
Area under GZ curv	2,3968	1,1651	0,3209	0,0000	0,3211	1,1644	2,4000	3,9323	5,3052	5,8139	4,9902	2,6694	-1,2443	-6,8072	-13,934	-22,386	-31,764	-41,510	-50,841	-58,630	-63,641	-65,308
Displacement t	185,0	185,0	185,0	185,0	185,0	185,0	185,0	185,0	185,0	185,0	185,0	185,0	185,0	185,0	185,0	185,0	185,0	185,0	185,0	185,0	185,0	185,0
Draft at FP m	2,588	2,624	2,622	2,615	2,622	2,624	2,588	2,493	2,358	2,167	1,817	0,831	n/a	-4,678	-3,747	-3,441	-3,288	-3,192	-3,125	-3,100	-3,127	-3,138
Draft at AP m	2,071	2,255	2,374	2,420	2,375	2,255	2,071	1,818	1,496	1,066	0,341	-1,646	n/a	-6,492	-4,462	-3,795	-3,480	-3,322	-3,265	-3,277	-3,288	-3,289
WL Length m	22,782	22,797	22,794	22,789	22,794	22,797	22,782	22,734	22,665	23,188	23,684	24,046	24,357	24,389	24,095	23,738	23,228	23,086	23,052	23,038	23,052	23,056
Beam max extents	6,791	7,064	6,906	6,843	6,906	7,064	6,791	6,014	5,330	4,950	4,879	4,849	4,274	4,171	4,269	4,507	4,890	5,473	6,361	7,088	6,903	6,843
Wetted Area m^2	174,96	172,54	173,45	175,68	173,45	172,54	174,95	180,79	186,05	189,20	190,95	189,71	187,49	187,87	189,25	191,56	195,13	200,38	208,08	228,43	232,72	232,06
Waterpl. Area m^2	123,44	123,97	125,36	128,53	125,36	123,97	123,43	120,14	109,06	101,99	98,943	95,750	90,618	87,366	87,090	89,404	94,351	102,69	115,31	130,63	135,39	135,31
Prismatic coeff. (Cp)	0,555	0,540	0,532	0,530	0,532	0,540	0,555	0,585	0,616	0,624	0,628	0,632	0,640	0,656	0,679	0,706	0,740	0,764	0,783	0,791	0,767	0,756
Block coeff. (Cb)	0,413	0,413	0,398	0,391	0,398	0,413	0,413	0,450	0,495	0,509	0,498	0,490	0,544	0,522	0,497	0,475	0,457	0,414	0,368	0,349	0,387	0,393
LCB from zero pt. (11,006	10,998	10,989	10,986	10,989	10,998	11,006	11,012	11,016	11,016	11,012	11,004	10,999	10,993	10,986	10,981	10,977	10,974	10,974	10,975	10,974	10,974
LCF from zero pt. (+	10,746	10,530	10,229	9,968	10,229	10,530	10,746	10,930	11,075	11,178	11,220	11,386	11,697	11,599	11,471	11,324	11,127	10,867	10,584	10,414	10,163	10,047
Max deck inclinatio	30,020	20,019	10,019	0,5050	10,019	20,019	30,020	40,018	50,015	60,010	70,005	80,001	90,000	99,999	109,99	119,99	129,99	139,99	149,99	159,99	169,99	179,60
Trim angle (+ve by s	-1,3416	-0,9568	-0,6427	-0,5050	-0,6417	-0,9563	-1,3423	-1,7502	-2,2363	-2,8546	-3,8230	-6,3994	n/a	-4,6959	-1,8537	-0,9183	-0,4980	-0,3376	-0,3629	-0,4596	-0,4173	-0,3918

Figura 3.31 Resultados de Maxsurf Stability Design

Como anteriormente, es necesario automatizar todo el proceso. En este caso, como se obtienen 21 valores por cada una de las condiciones (incluyendo la posición de la cresta de la ola), se obtendrían un total de 108240 valores a calcular. En este caso es completamente necesaria la automatización, resultando imposible el cálculo de tal volumen de datos de forma manual. Nótese que el cálculo de dichos valores tarda una cantidad considerable para un

22	GZs por posición	Entre -30° y 180°
20	Posiciones de olas por longitud de onda	Entre 0 (proa) y 0,95 (5% a popa)
41	Frecuencia de olas	Entre 0,4 y 2,4
6	Pendientes de ola	Entre 1/200 y 1/15
108240	TOTAL	Datos a calcular

ordenador doméstico (unas 7 horas).

Al obtener valores para cada uno de los datos, hay que añadir un bucle más al script anterior que contemple cada una de las posiciones de la cresta de la ola. Además de ello, el reporte que se obtiene en el Excel será un poco diferente, ya que tiene que albergar más tablas de datos. Al tratarse de una cantidad de datos muy voluminosa, se introducirán algunas de las tablas a modo de ejemplo en el Anexo 6.

Una vez obtenidos todos los valores del software, tendrán que ser introducidos en el modelo matemático. Este modelo será similar al anterior, con una clara diferencia; los valores correspondientes al elemento recuperador serán ahora dependientes del GZ, que, a su vez, es dependiente del ángulo de escora. Se introduce, por cada pendiente a calcular, una matriz tridimensional de 181 por 101 por 201 valores. Cada una de las “profundidades” de la matriz se corresponde a una frecuencia en concreto. La matriz encontrada una vez definida una frecuencia tendrá en su interior valores de GZ dependiendo del ángulo de escora y la posición de la cresta de la ola.

En cada una de las soluciones de la ecuación diferencial que el modelo matemático obtenga se introduce un GZ en concreto, dependiente de estos 4 elementos. Mediante interpolación lineal, las matrices calculadas mediante Maxsurf Stability Design pueden ampliarse para obtener una mayor cantidad de datos.

En el elemento recuperador, dentro del modelo, se ha añadido una variable de signo para saber si se trata de una escora positiva o negativa (las escoras positivas serán a babor y las negativas a estribor). A pesar de que la banda a la que el buque escore no es muy relevante (ya que este buque es simétrico) es necesario saber el signo para escoger de manera correcta los valores de GZ.

Tanto el script que genera las matrices generales de GZ como el modelo matemático serán adjuntados en un anexo que acompañará este documento (en los Anexos 8, 9 y 10)

3.1.2.2 Resultados

Con la generación de los valores de los brazos adrizantes y los datos calculados en el apartado del modelo anterior se puede generar un nuevo modelo más exacto del comportamiento del buque ante olas de proa. Como anteriormente se ha mostrado para el modelo simplificado, si se representan series temporales de la pendiente 1/200, se obtiene las siguientes figuras:

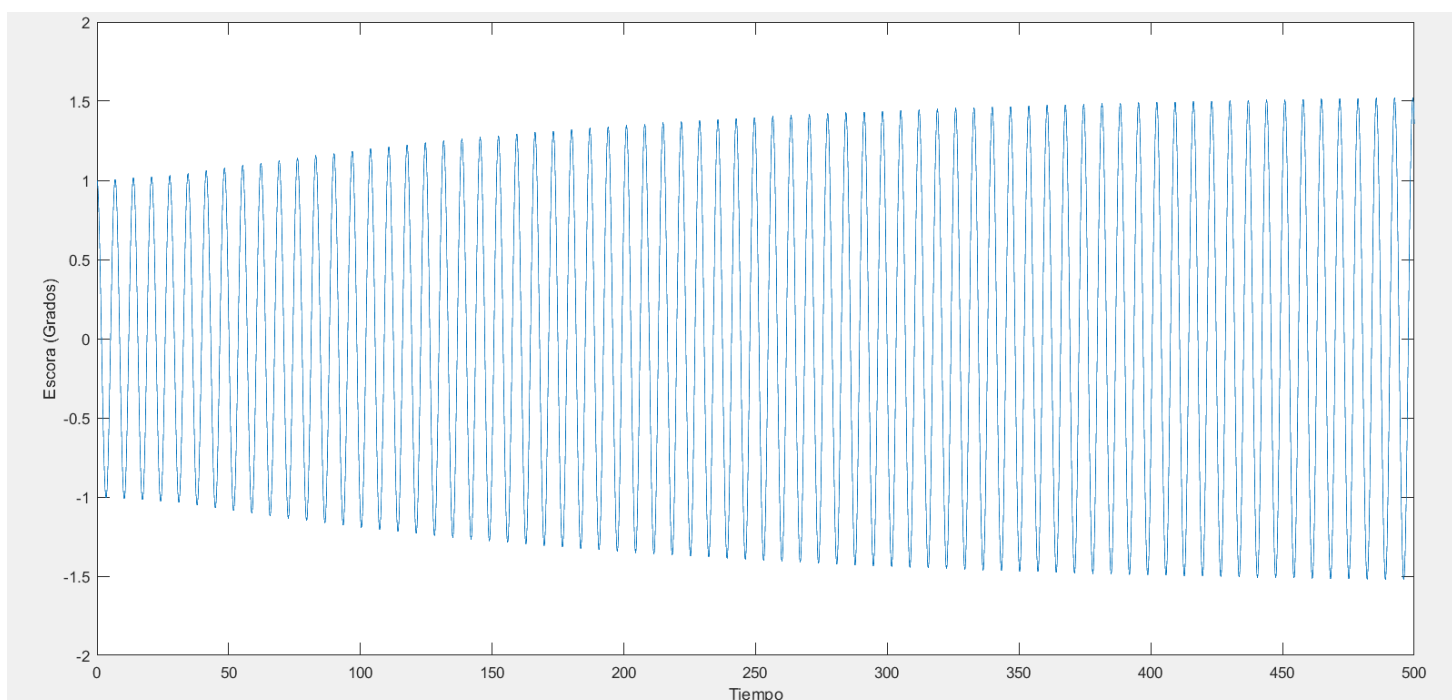


Figura 3.32 Escora modelada en pendiente 1/200 para una frecuencia de 1,81 rad/s

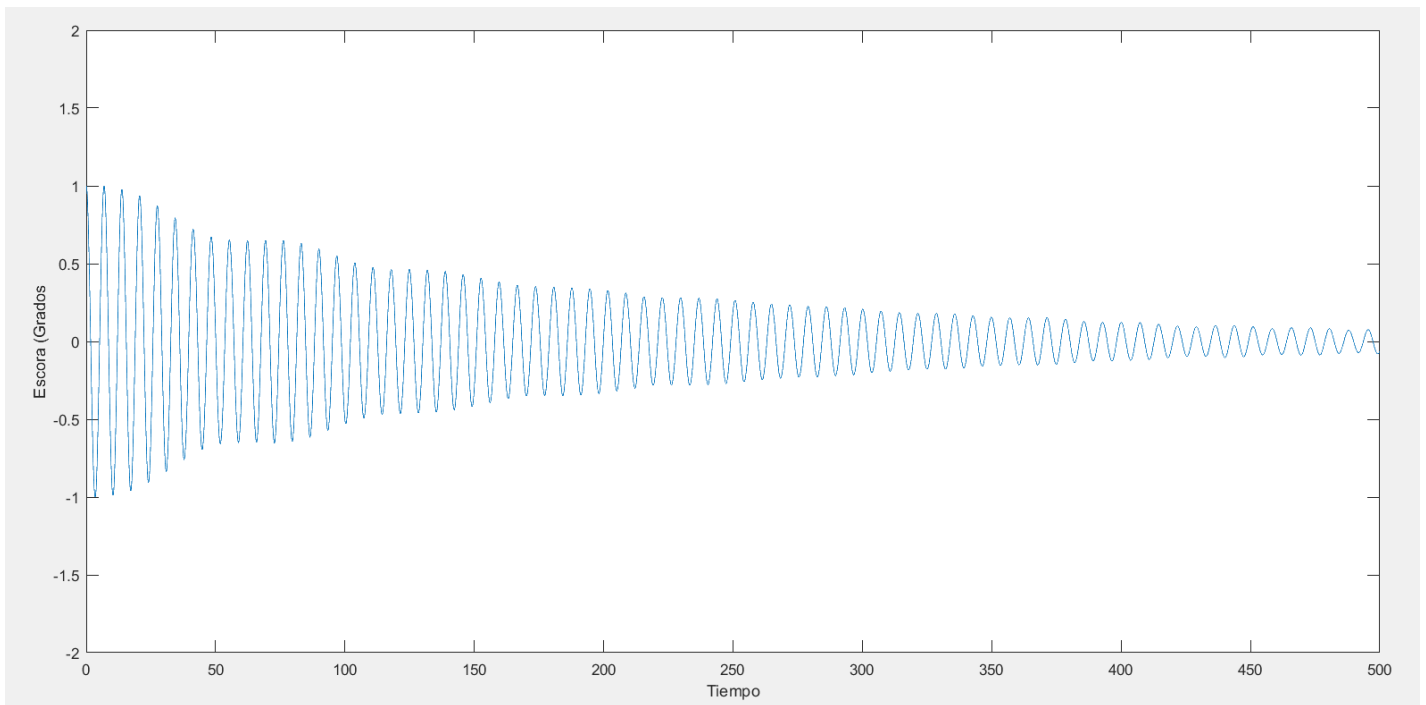


Figura 3.33 Escora modelada en pendiente 1/200 para una frecuencia de 1,91 rad/s

Se puede observar que, aunque la segunda de las frecuencias sea similar a la que se ha visto en el caso del modelo matemático simplificado, tienen pocas similitudes entre sí. Sus amplitudes son muy diferentes, e incluso se produce resonancia en la serie del modelo simplificado donde no se produce en las de modelo no lineal. Si se observan las amplitudes mostradas en la pendiente 1/50:

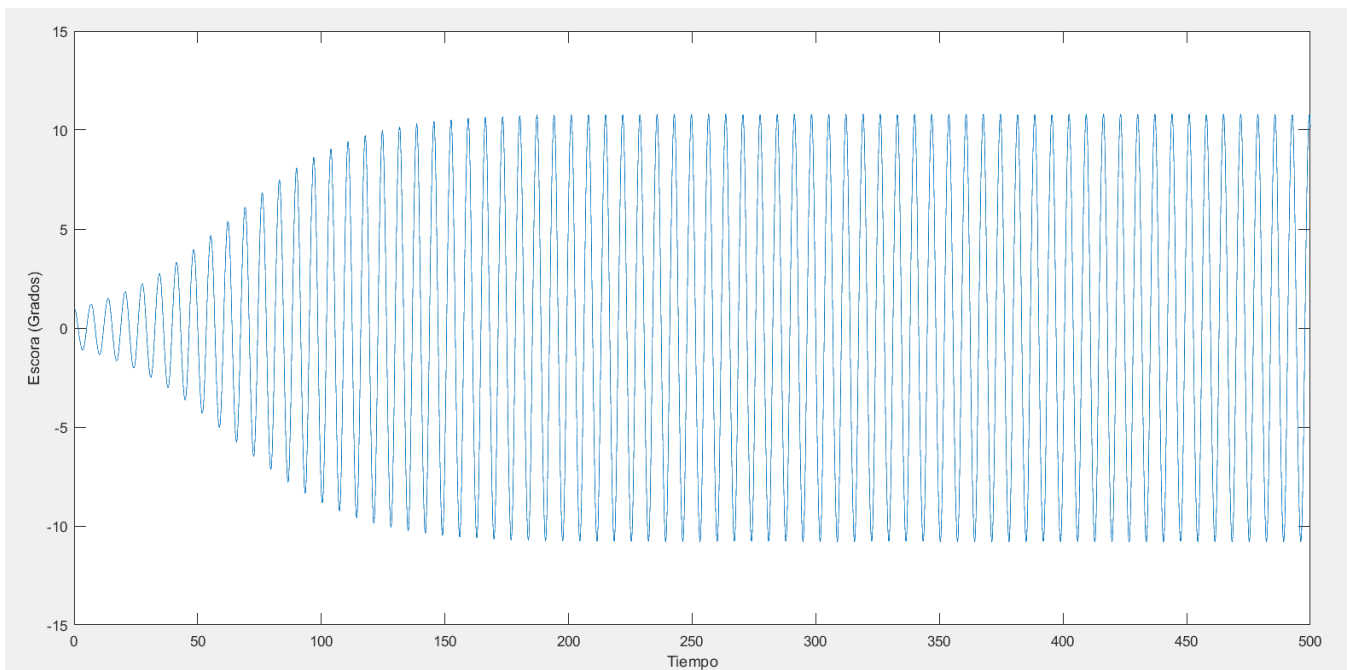


Figura 3.34 Escora modelada en pendiente 1/50 para una frecuencia de 1,81 rad/s

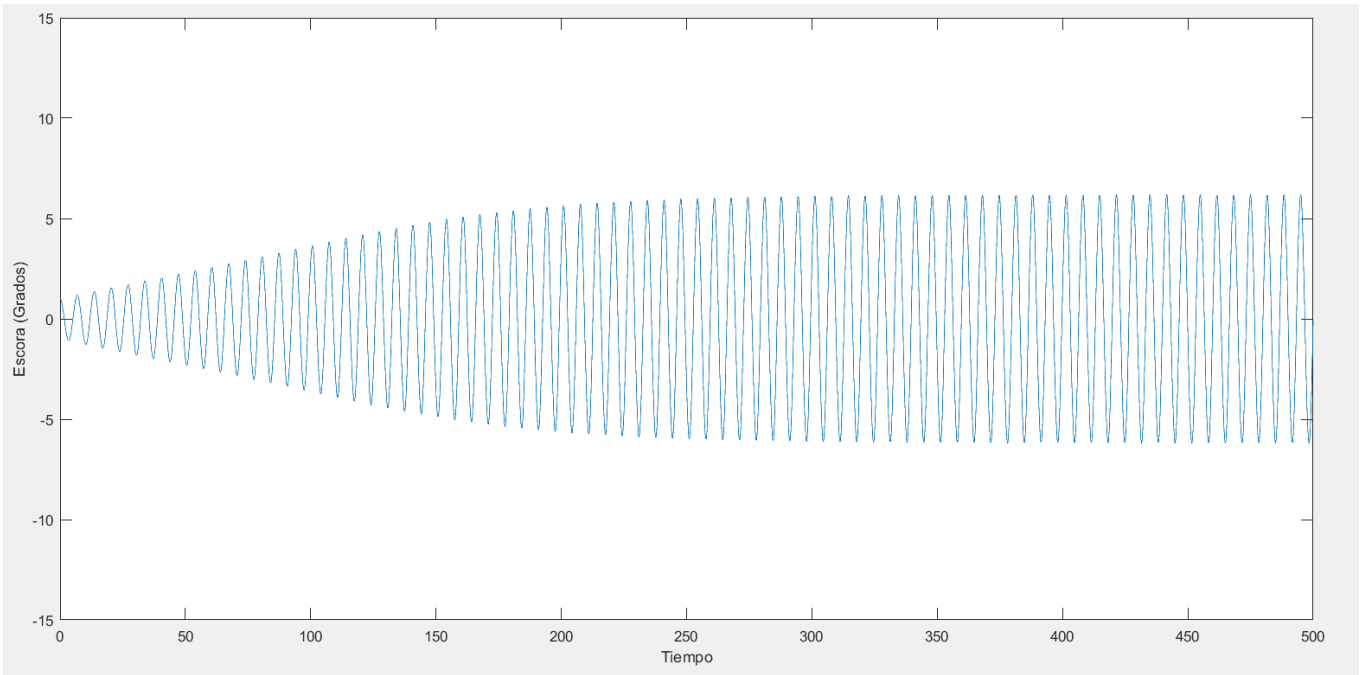


Figura 3.35 Escora modelada en pendiente 1/50 para una frecuencia de 1,88 rad/s

En esta segunda pendiente los valores se parecen mucho más a los observados en el modelo simplificado. Aun así, las amplitudes que se observan en el caso del modelo con alturas metacéntricas son mucho mayores, llegando a ser hasta 3 veces más grandes en los valores más altos de este modelo.

Si se realiza una representación similar a la que se hizo con los valores máximos de frecuencias en el caso simplificado, se puede obtener una figura mucho más definida que la anterior. Esta representación se obtiene utilizando tan solo los valores máximos de cada una de las frecuencias analizadas, sólo un punto por cada frecuencia:

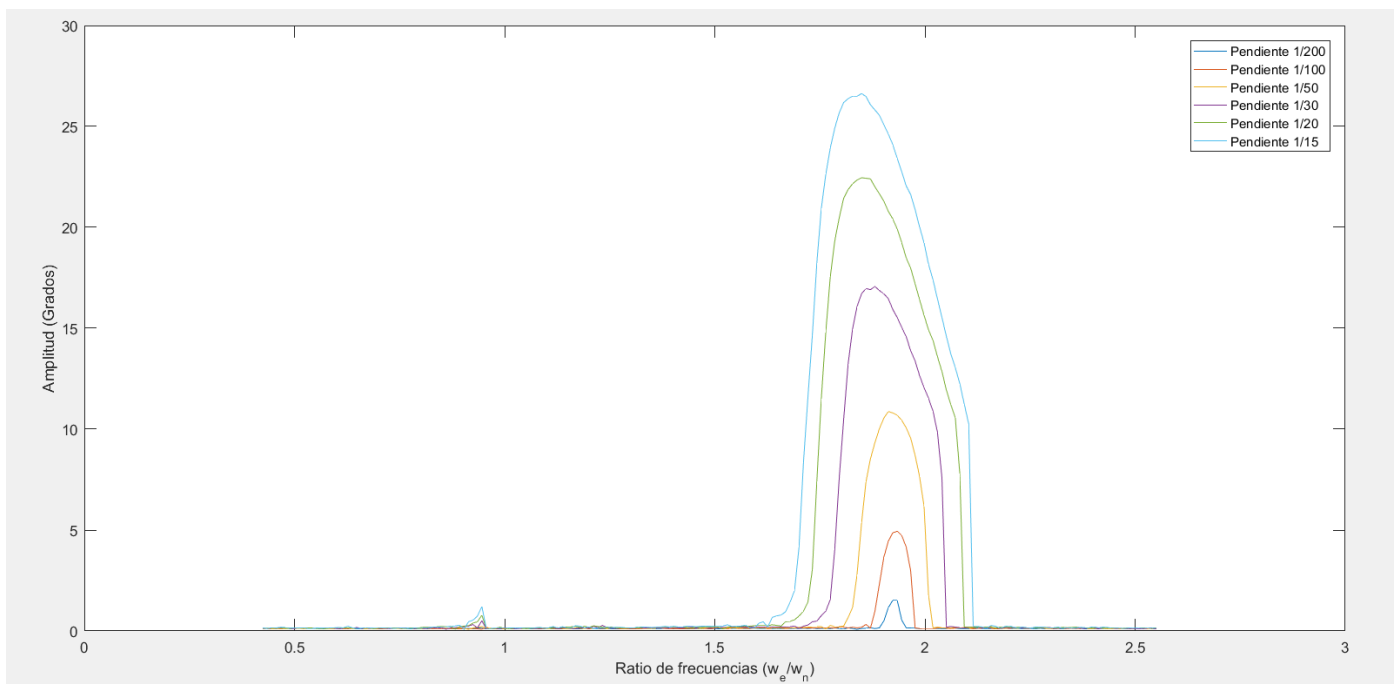


Figura 3.36 Frecuencias que generan resonancia a diversas pendientes en modelo de brazos adrizantes

La figura, como las anteriores, es representada frente al ratio entre la frecuencia de encuentro y la frecuencia natural. Esta representación indicará en el valor 2 una frecuencia de encuentro dos veces la frecuencia natural (cerca de 1,88 rad/s).

Este caso, mucho más realista al anterior, se puede ver una zona mucho más acotada cercana al valor 2, valor en el que se dobla la frecuencia natural. Se observa también la tendencia de los valores a reducir la frecuencia máxima en la que se produce resonancia hacia la izquierda. El fenómeno del “softening” se produce en este caso, aumentando, a medida que se aumenta el valor de la pendiente (y por consiguiente los valores de GZ), su frecuencia natural.

Además de la forma, se pueden observar unas amplitudes máximas mucho menores. Esto se debe principalmente al carácter no lineal de los brazos adrizantes al aumentar el ángulo de escora. Una vez el buque llega a valores de escora muy altos, el valor del brazo adrizante no contribuye al aumento de la escora mediante el término recuperador, ya que los GZ disminuyen llegado a un punto. Esta consideración hace que el modelo sea mucho más lógico, llegando a valores de escora no tan límites (con un valor máximo de 27 grados).

3.2 Modelo físico. Ensayos en canal.

Una vez determinados los modelos matemáticos simplificado y no lineal se han de realizar los ensayos en canal para obtener resultados a comparar. Los ensayos en canal se realizarán con el modelo a escala del MFV Trident. Este modelo está a escala 1/15, con las siguientes características:

Calado del buque	2,507 m
Desplazamiento	54,810 kg
Trimado inicial	0 m
Puntal a cubierta principal (Sección media)	0,287 m
Eslora	1,72 m
Manga	0,4457 m

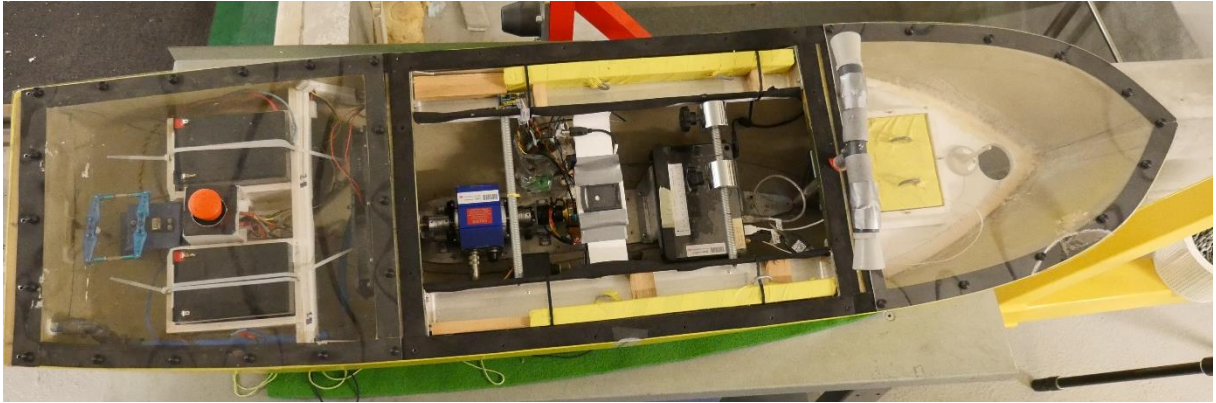


Figura 3.37 Modelo del buque MFV Trident

Como se puede observar, el modelo tiene una gran cantidad de elementos en su interior para la realización de experiencias. Entre estos elementos se encuentran una gran cantidad que no serán utilizados en los ensayos que se realicen, aunque serán dispuestos para dejar centro de gravedad en su posición. Entre ellos se encuentran:

- Una pequeña unidad ordenador para procesar datos
- Dos baterías en la parte de popa para suministrar energía a todos los elementos que la necesiten
- Un pequeño motor para realizar pruebas autopropulsadas
- Un timón y su correspondiente control para poder darle rumbo en las pruebas autopropulsadas.
- Varios lastres (piezas en color amarillo) para simular una condición de carga concreta.
- Una seta de paro de emergencia.
- Un sonar y un receptor de radio.
- Unos pesos desplazables para variar el centro de gravedad transversalmente.

Entre los elementos que si se utilizarán para las experiencias, se encuentran los siguientes:

- Un soporte para alojar la IMU (unidad que medirá los movimientos del buque).
- Unos cabos en la parte de proa y popa, utilizados para que el modelo no quede a la deriva.

Además del modelo en sí y las instalaciones, se utilizarán los programas necesarios para la lectura de las mediciones de las IMUs y programas para la medición del oleaje. Los elementos correspondientes a pruebas autopropulsadas no serán utilizados en las experiencias a realizar, tan sólo se encuentran en el modelo para simular las formas y elementos de un buque real.

3.2.1 Prueba de estabilidad

La prueba de estabilidad es una prueba realizada comúnmente para buques y modelos de buques. Esta prueba determina las características del centro de gravedad del modelo y, por consiguiente, las características del centro de gravedad del buque. Al realizar la prueba, se obtendrán los valores exactos de alturas de centro de gravedad.

La prueba se ha realizado con el modelo en la zona de pruebas destinada a ello. En esta zona, el buque se encontrará en estado de reposo, con trimado 0 y escora mínima.



Figura 3.38 Modelo en la zona de pruebas de estabilidad

Para la realización de la prueba, además del recipiente donde se realiza y el modelo, se dispone de dos pesos de unas dimensiones y peso conocidos. Además, se dispondría de un clinómetro, un dispositivo electrónico para la medida de escora del buque, necesaria para poder concluir la prueba con los valores necesarios. Nótese que este último dispositivo, el clinómetro, tendrá que ser añadido al peso del buque completo, reduciendo de esta manera el valor de GM.

Una vez dispuesto el buque en el recipiente, se dispone el clinómetro en la cubierta, cerca de la sección media. Con el clinómetro dispuesto, se procederá a introducir el o los pesos necesarios para la prueba. En este caso se ha considerado realizar varias pruebas:

- Un peso a estribor
- Un peso a babor
- Dos pesos a estribor
- Dos pesos a babor

En primer lugar, en todas las pruebas se mide la condición de equilibrio con los pesos en la línea de crujía. Estos pesos no contribuirán al brazo escorante, ya que el buque se encuentra en equilibrio y se trata de un modelo simétrico. La medición obtenida en todos los casos muestra una pequeña escora hacia estribor, de 0,25 grados, que será compensada en los cálculos posteriores para la obtención de los valores a conseguir.

Posteriormente, dependiendo de la prueba a realizar, se irán desplazando el o los pesos hacia uno de los costados. Se ha considerado un paso de dos centímetros desde la línea de crujía hasta un total de 16 centímetros, valor límite para el movimiento de los pesos (la manga no permitiría el desplazamiento del peso a una distancia mayor).

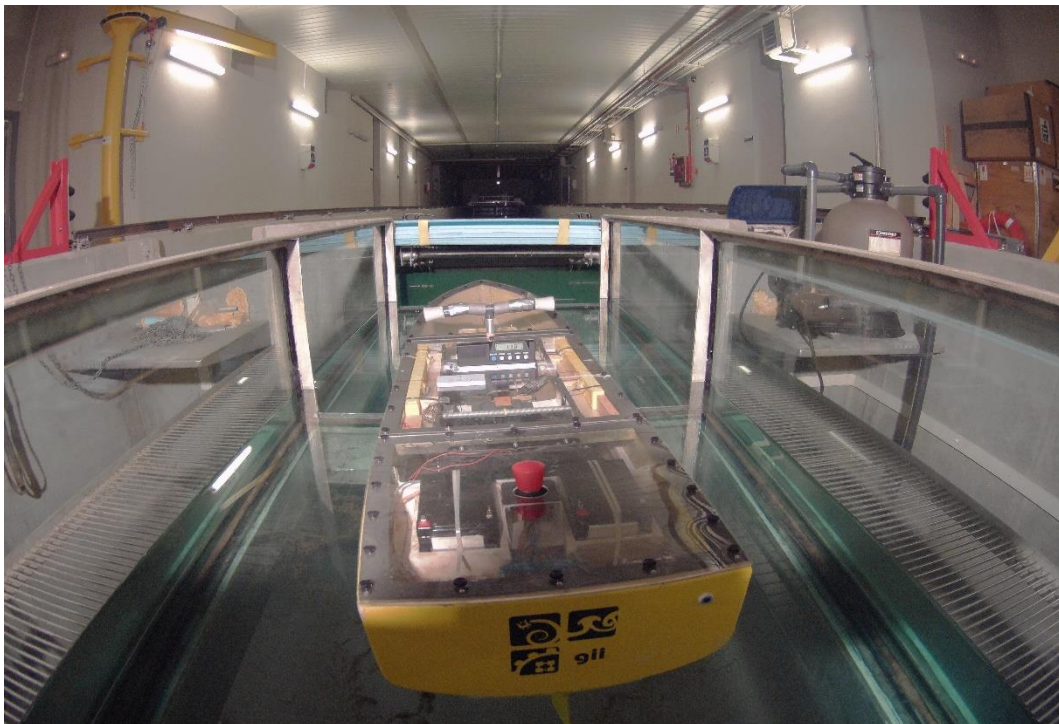


Figura 3.39 Realización de la prueba de estabilidad

Las medidas a extraer en todos los casos han sido los calados en babor y estribor y la lectura del clinómetro, valor mucho más exacto que el leído en las regletas del modelo. Una vez extraídos los datos de las medidas en todas las condiciones, obtendremos varias tablas de escora y movimiento de pesos.

Al tener varias medidas, se podrá obtener un valor más contrastado de la posición del centro de gravedad. En cuanto al valor de GM, bastará relacionar los centros de gravedad del peso y del modelo con la tangente de los ángulos de escora, dependiendo de en qué distancia se encuentre el peso, de la siguiente manera.

$$GM_{exp} = \frac{P \cdot d}{\Delta_{exp} \cdot tg(\mu)} \quad [28]$$

Los valores medios se obtendrán al final, por lo que se seguirá operando con varios GMs.

En este caso se ha optado por realizar dos cálculos separados para las pruebas de un peso y las pruebas de dos pesos. En los cálculos, se obtienen los valores de escora con respecto a la posición inicial (0,25°) y se realiza una media, introduciendo los valores de babor y estribor. Una vez se tiene un valor por distancia a la que se ha movido el peso, se puede calcular GM

Para las pruebas con un solo peso, la media de la altura metacéntrica del modelo es de 0,02859 metros, que, al aplicar la escala del modelo (1/15, como se ha indicado anteriormente), indica 0,434 metros.

Si se realizase una operación similar para la condición con dos pesos, se obtendría un resultado en GM de 0,415. La media de ambos valores indica un valor de 0,425. A pesar de que parezca el valor correcto, faltaría restarle los pesos y el peso del clinómetro al valor.

Para obtener el valor del GM que será considerado en el buque, se ha de calcular primero los KG con los pesos de la experiencia. Utilizando el software Maxsurf Stability Design anteriormente utilizado para el modelo matemático se pueden obtener estos datos rápidamente. Tan sólo habrá que introducir el desplazamiento escalado que deriva de los pesos de la experiencia. Se determina un KM prácticamente similar (3,717 y 3,716). De estos valores se realizaría la media y se restaría a GM, para obtener la altura del centro de gravedad

Ahora, para realizar la operación de centro de masas, se han de obtener además los KG de los pesos. Esto se mide directamente en los pesos y el clinómetro. El puntal en la sección media del modelo es de 0,287 metros. Los datos se pueden observar en las tablas a continuación. El peso 1 y el 2 son similares:

Peso 1	X	Y	Z	
Dimensiones	10	4,95	0,9	cm
G	5	2,475	0,45	cm
Peso	540	g		

Clinómetro	X	Y	Z	
Dimensiones	2,5	17,4	6	cm
GM	1,25	9,2	2,5	cm
Peso	345	g		

Teniendo el valor Z de los GMs de los pesos, bastaría con sumar el puntal hasta la cubierta superior del modelo y el valor Z correspondiente.

Con estos datos se determinaría el valor de KG de los pesos. Ahora se determinaría el KG del buque sin los pesos:

$$KG_{buque} = \frac{\Delta_{exp} \cdot KG_{exp} - P_{exp} \cdot KG_{peso}}{\Delta_{buque}} \quad [29]$$

Nótese que habrá que restar, además de 1 o 2 pesos dependiendo qué experiencia se utilice, el peso del clinómetro. También hay que tener en cuenta que el valor de KG ha de ser escalado o sin escalar, dependiendo de la interpretación de los demás valores (si se trabaja con valores de modelo, KG ha de ser del modelo).

Ahora, con el KG del buque determinado, se puede obtener el GM. El KM será calculado de la misma manera que se calculó para las condiciones de ensayo.

$$GM_{buque} = KM_{buque} - KG_{buque} = 0,4465 \text{ m}$$

Este valor, siendo el determinado para el modelo físico, ha sido el utilizado para la generación de los GM o GZ en el modelo matemático. De esta manera, los valores obtenidos podrán ser comparados sin problemas.

3.2.2 Ensayo de decaimiento

El ensayo de decaimiento se utiliza para obtener los valores de amortiguamiento del buque. Aunque software como el Amarcón Octopus Office pueden reportar este dato, muchas veces no tienen en cuenta el valor cuadrático del amortiguamiento, reportando tan solo el valor lineal. Por ello se considera necesaria la realización de esta experiencia.

La realización de la experiencia es sencilla. Una vez el modelo se encuentre en el canal en una disposición adecuada (perpendicular al canal para evitar rebote de olas) y el sistema de captación de datos se encuentre en su sitio (en el interior del modelo se dispondrá una IMU para obtener reportes de la experiencia) comenzaría el ensayo. Mediante una excitación en uno de los extremos del buque, el modelo oscila libremente en el canal hasta que su movimiento se amortigua prácticamente en su totalidad.

Al escorarlo una cantidad y dejarlo oscilar libremente, la IMU captará principalmente el movimiento en su cuarto grado de libertad, el correspondiente al balance. Al realizar la excitación, se tratará de no aplicar movimiento al grado de cabeceo, ya que éste puede modificar altamente la oscilación de balance. La operación se repite una cantidad de veces (en este caso, 7).

La IMU, utilizada para la captura de movimientos en la experiencia, se trata de un elemento que mide los movimientos de la misma realizados en el espacio. En su interior se encuentran diversos sistemas de medición (giróscopos, magnetómetros...) para saber su posición y orientación en todo momento. Mediante una señal de radio que recoge el software implementado en un ordenador se reportan los datos de movimiento. El modelo de IMU utilizada se puede observar en la siguiente figura:



Figura 3.40 IMU Xsens utilizada para la medición en los ensayos

Mediante el software ya implementado de la IMU (Xsens MT Manager) se obtiene un reporte tal y como se muestra en la siguiente figura:

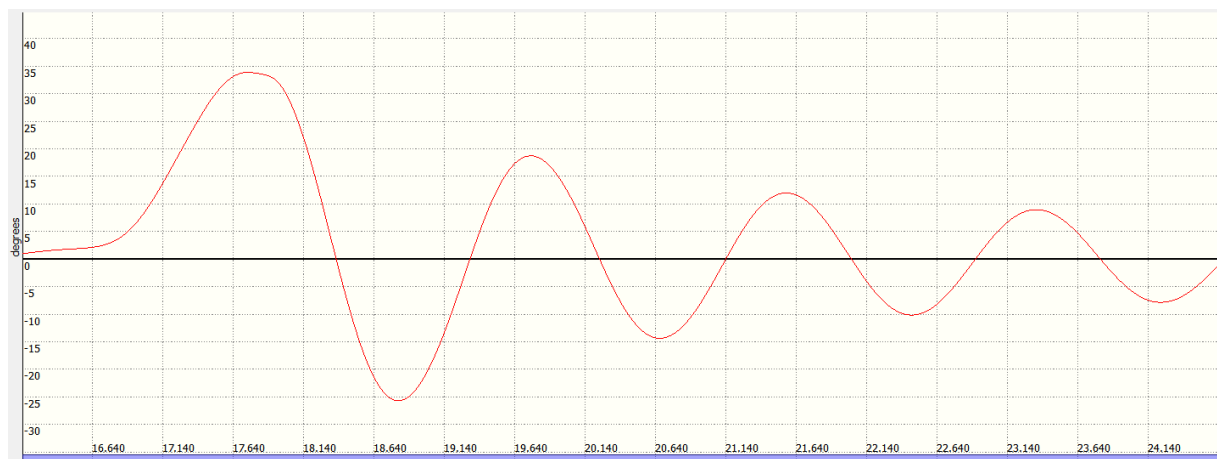


Figura 3.41 Resultado reportado por la IMU del ensayo de decaimiento

En la gráfica anterior (Figura 3.41) se puede observar las fases de la experiencia. La línea roja correspondería al ángulo de escora en cada instante reportado por la IMU. Al inicio de la experiencia se puede ver una alta perturbación en el ángulo de escora, correspondiente a la primera excitación. Una vez pasado esa excitación, el buque oscila y comienza a amortiguarse. Este reporte se puede obtener en formato tabla sin problemas.

Se utilizarán como datos para obtener los valores de amortiguamiento aquellos que no se vean influenciados por la excitación inicial, ya que esta excitación no es exacta y tiene grandes irregularidades. Por ello, se desecharán las primeras oscilaciones y se realizará el cálculo con las siguientes.

Los datos obtenidos de la IMU, dependiendo de la frecuencia de muestreo, serán una cantidad u otra. Para la frecuencia de muestreo utilizada en esta prueba, 50 Hz, se obtienen una media de 6000 valores para cada experiencia. Primeramente se han de obtener los máximos y mínimos de la función sinusoidal que reporta el programa. Para ello, una función programada llamada "findextr", de Matlab, devolverá los valores necesarios [26]. La función devuelve, sin contar el valor inicial, los valores máximos y mínimos que se encuentran en la función sinusoidal, además de los valores de tiempo en los que se producen.

Para normalizar las experiencias, se han tenido en cuenta un total de 65 segundos para todas ellas. De esta manera, los resultados obtenidos podrán ser comparados y utilizados en valores medios. A continuación se pueden observar varias gráficas que representan algunos de los movimientos de la prueba de decaimiento, utilizando valores de excitación inicial diversos:

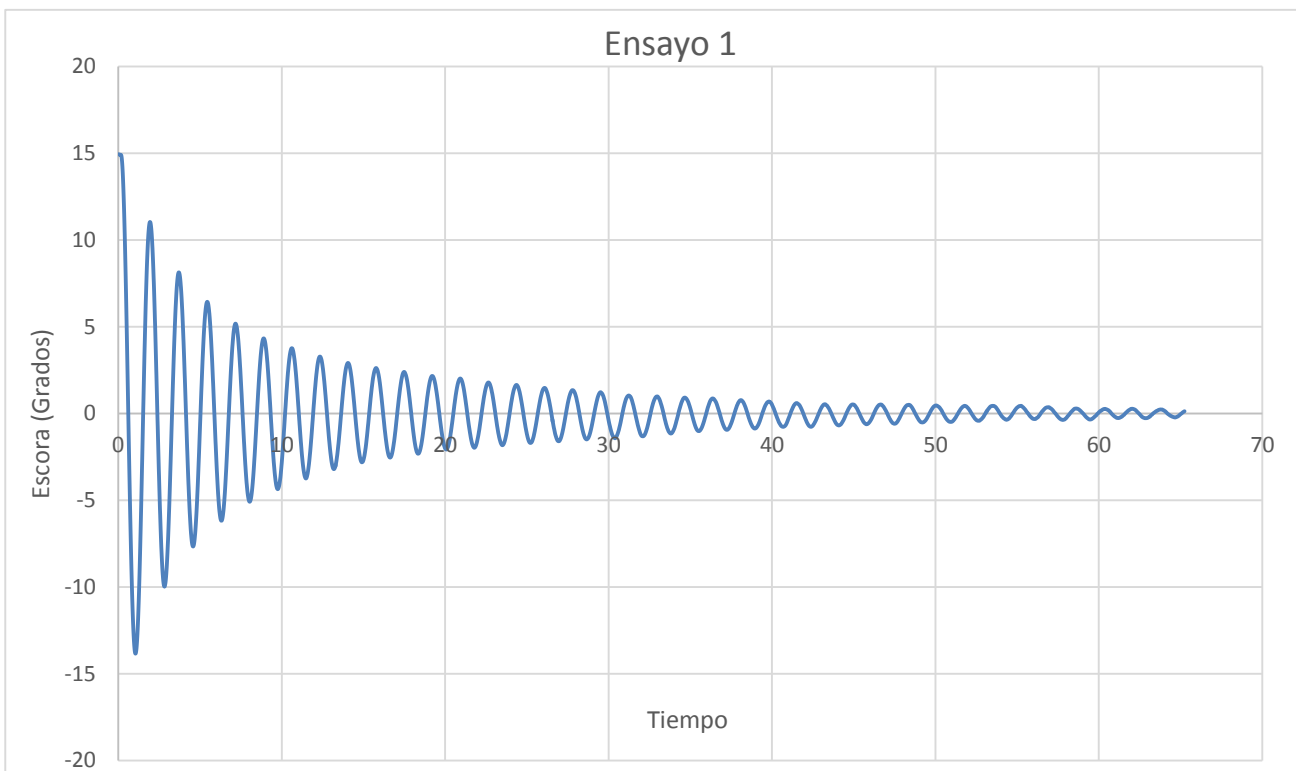


Figura 3.42 Función Ensayo 1 de prueba de decaimiento

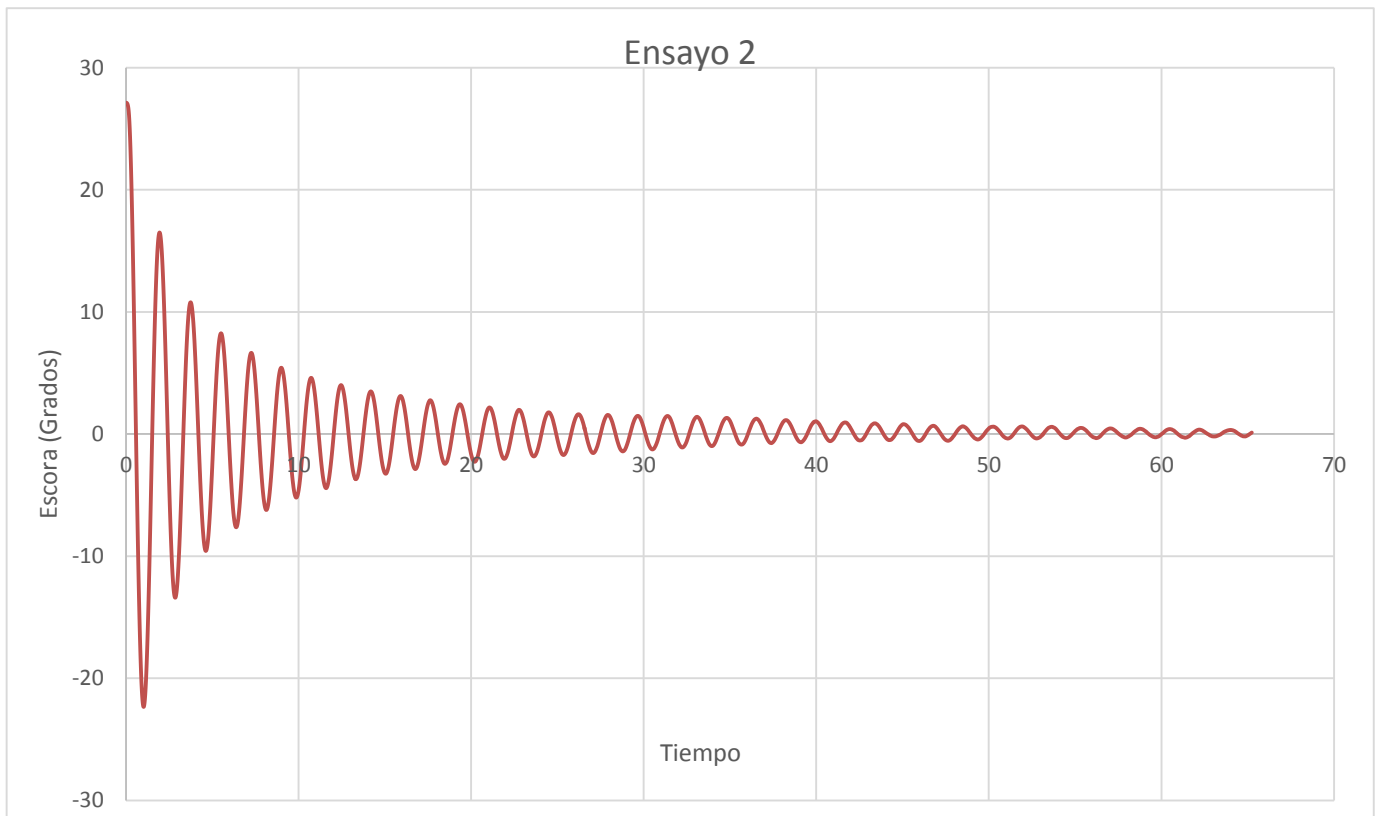


Figura 3.43 Función Ensayo 2 de prueba de decaimiento

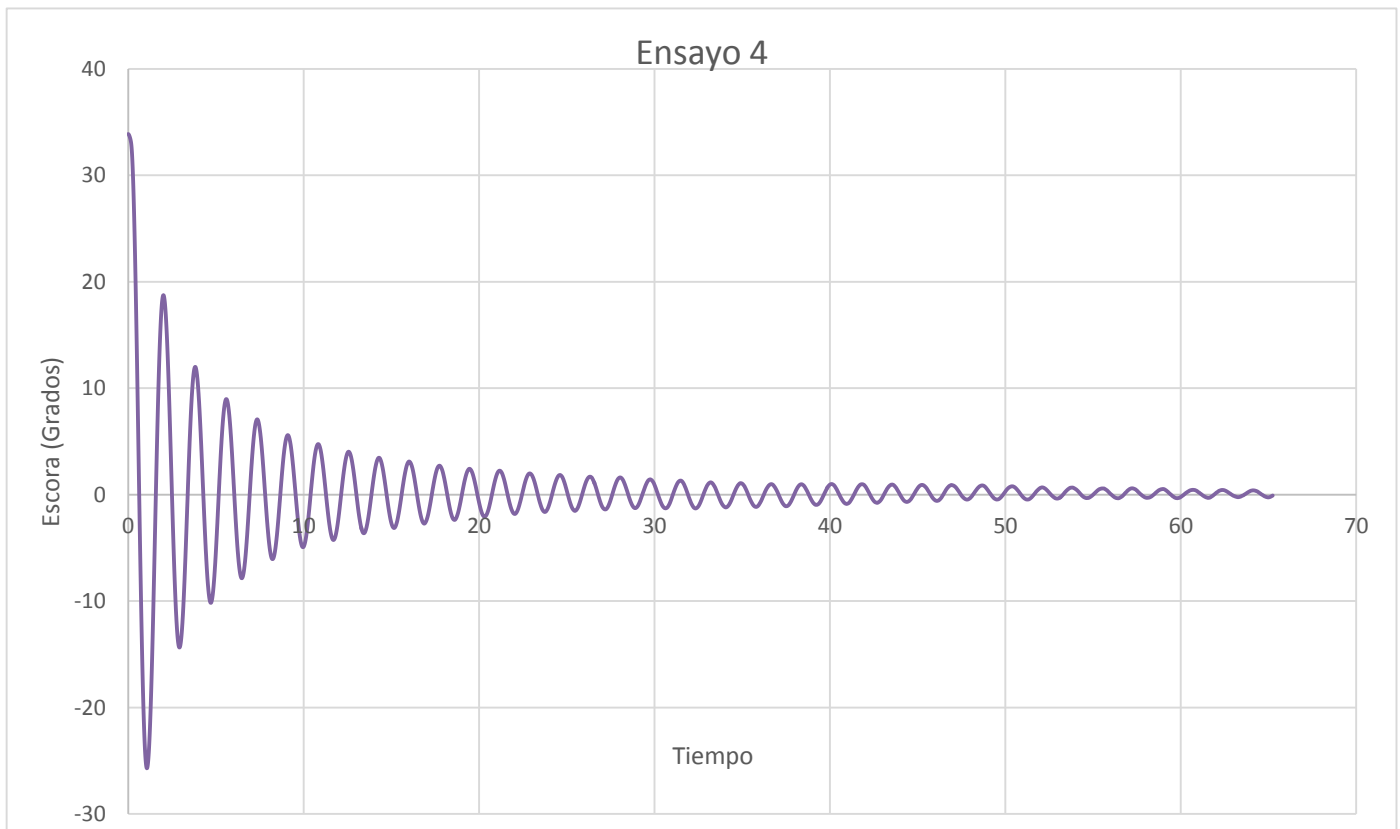


Figura 3.44 Función Ensayo 4 de prueba de decaimiento

Como ya se puede observar a primera vista en las gráficas anteriores, todas las funciones coinciden prácticamente en los momentos en los que se producen los máximos y los mínimos, sin depender de la amplitud del movimiento.

Una vez obtenidos todos los valores de máximos y mínimos de los ensayos se procederá al cálculo de los coeficientes de amortiguamiento y frecuencia natural tal y como se explica en el texto [27]. Este texto se centra en la obtención de los coeficientes de la curva polinómica de tendencia que se genera al enfrentar los valores de variación entre un máximo y el siguiente frente a los valores medios que se encuentran entre un máximo y el siguiente. En cuanto a la frecuencia natural, basta con obtener el período medio que se encuentra en todos los ensayos y calcular la frecuencia correspondiente.

La obtención de los coeficientes de la curva de tendencia pueden ser obtenidos mediante las relaciones mostradas en [28]. Microsoft Excel puede mostrar directamente la línea de tendencia polinómica forzando a que ésta pase por 0 para no obtener ningún valor independiente de la variable. De esta manera, los valores que acompañan a “x” en esta ecuación de la curva son los valores buscados.

Una vez obtenidos todos los valores medios entre máximos y entre mínimos y las variaciones entre máximos y entre mínimos, se obtiene la siguiente gráfica:

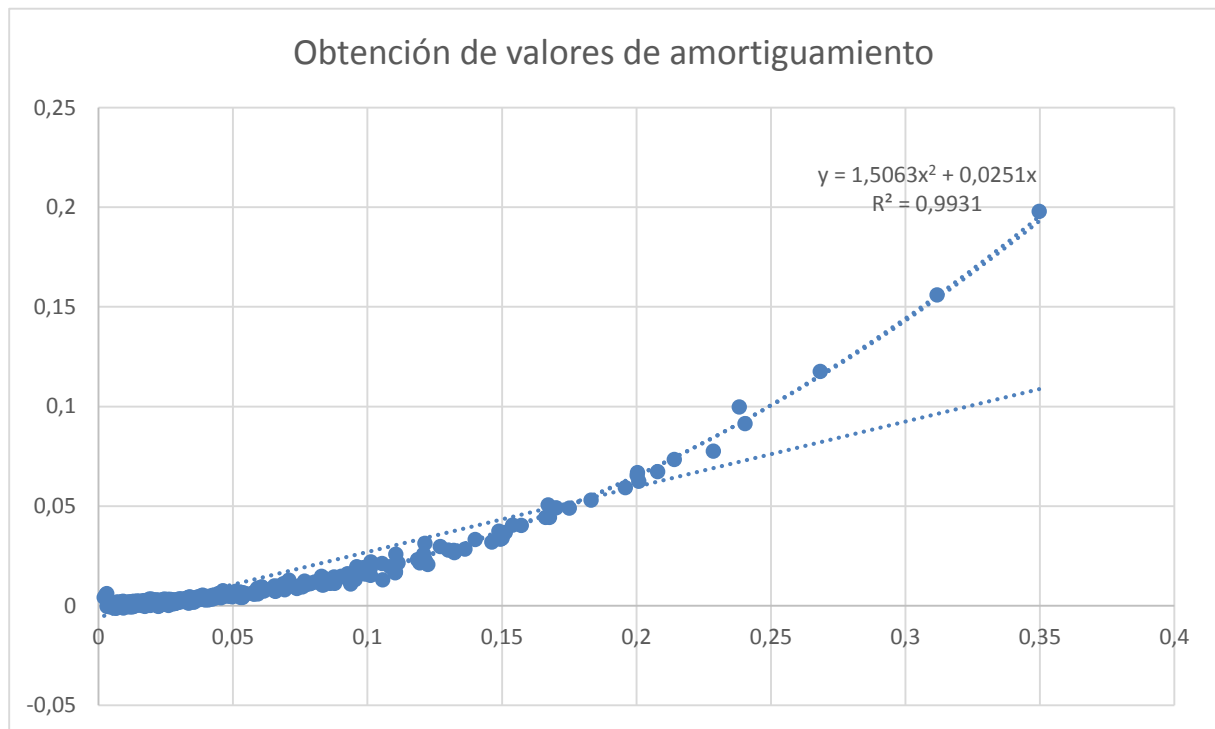


Figura 3.45 Obtención de los valores de amortiguamiento

Y, en la parte superior de la gráfica se muestra la ecuación correspondiente a la curva de tendencia. Con todos los datos obtenidos, los valores de B_{44a} y B_{44b} se calculan mediante la siguiente relación, que se puede encontrar en [28]:

$$B_{44b} = \frac{3 \cdot \Delta \cdot GM \cdot K2}{4 \cdot \omega_e^2} \cdot g \quad [30]$$

$$B_{44a} = \frac{2 \cdot \Delta \cdot GM \cdot K2}{\pi \cdot \omega_e^2} \cdot g \quad [31]$$

, donde:

- Δ es el valor del desplazamiento del buque, sin escalas
- GM es la altura metacéntrica calculada anteriormente
- K1 y K2 son los valores constantes de la línea de regresión (lineal y cuadrático)
- ω_e es la frecuencia natural del buque

De esta manera, se muestran los siguientes datos y resultados:

Escala	15	K2	K1
GM(m)	0,446	1,5063	0,0251
Frecuencia natural (rad/s)	0,941	B44b (t·m ² /s)	B44a (t · m ²)
Desplazamiento (t)	184,984	1032,455	13,742701
		516,228	6,8711

Los valores reales de B_{44a} y B_{44b} son los que se muestran en la parte inferior de la columna correspondiente a los coeficientes. La división entre dos se debe a que se han realizado los cálculos con máximos y mínimos indistintamente, por lo que se obtiene el doble del valor real. Estos valores, como se ha mencionado en el apartado del modelo matemático, serán los mismos a fin de poder comparar los valores finales.

3.2.3 Ensayos en canal

Una vez obtenidos todos los valores del modelo de la embarcación, se podrán comenzar los ensayos en el canal. Como anteriormente se ha referenciado, los ensayos serán realizados en el canal de experiencias de la Universidad de La Coruña, en el Centro de Investigación Tecnológica, en Ferrol. Las instalaciones constan de un canal de 3,80 metros de ancho y 55 metros de largo. Este canal sirve para modelar diversos tipos de ola que permitirán realizar ensayos con el modelo para comprobar el comportamiento del mismo ante diversas condiciones.

Estas condiciones serán las anteriormente consideradas en el modelo matemático. Las condiciones consideradas han de ser escaladas para que el modelo tenga los mismos movimientos que el buque a tamaño real. Para escalar los valores de la ola, habrá que multiplicar la frecuencia por la raíz de la escala y dividir la altura de ola por la escala.

$$\omega_{modelo} = \omega * \sqrt{15}$$

$$H_{modelo} = \frac{H}{15}$$

Además de esta simple operación, el canal de experiencias tiene un rango de funcionamiento al que se han de ceñir los diversos análisis que se realicen. Esta curva de funcionamiento alturas de 5 centímetros a 30 centímetros y períodos de 0,5 rad/segundo a 3 rad/segundo. Por ello, los ensayos en algunas de las pendientes planteadas en el modelo matemático quedan parcial o totalmente restringidos, sin poder obtener datos de estas pruebas. Estos datos han sido obtenidos del trabajo “Análise numérica e experimental do balance de ondas de través dun buque de pesca” realizado en paralelo al presente por Pedro Ojea González [29]. La curva de funcionamiento de la pala es la siguiente:

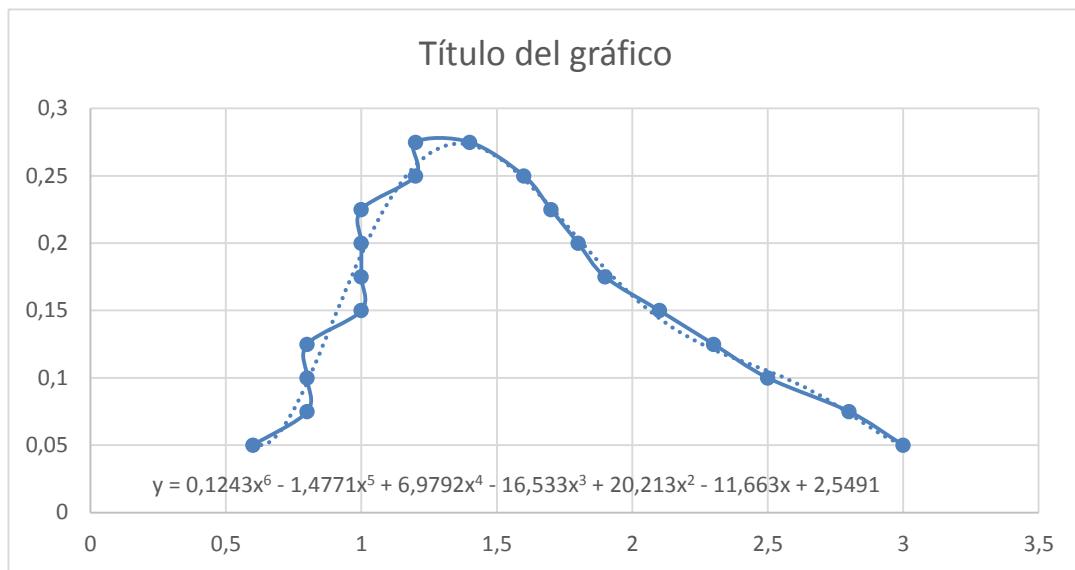


Figura 3.46 Curva de funcionamiento de la pala

Con el fin de acotar los ensayos a realizar, éstos se centrarán en aquellas frecuencias cercanas a la resonancia, teniendo más interés que aquellas pruebas en las que no se desarrolle ningún tipo de resonancia paramétrica. Esto anula las pendientes más pequeñas, ya que no se obtienen olas que puedan ser realizadas con la pala que se encuentra en el canal. Se realizarán un total de 29 ensayos, con pendientes comprendidas entre $\frac{1}{50}$ y $\frac{1}{15}$ y frecuencias comprendidas entre ratio 1,8 y 2,1 (ratio entre frecuencia de la ola y frecuencia natural).



Figura 3.47 Canal de experiencias del Centro de Investigación Tecnológica, Ferrol

Para realizar los ensayos, se han de seguir los siguientes pasos:

- Primero, es necesario realizar las diversas calibraciones en los equipos a utilizar. Uno de los elementos a calibrar más importantes será la pala. Para calibrarlo, un modo de prueba propio se encuentra en el ordenador control. Este modo realizará unas olas de tipo aleatorio para calibrar las sondas de la pala. Se realizarán, al inicio de los ensayos, uno o dos tests, dependiendo de las medidas que se obtengan,
- A continuación, se dispondrá en el interior del canal el modelo. El modelo ha de tener en su interior la unidad que procesa los datos de movimientos (IMU). Para el modelo que está dispuesto, se ha de cambiar la unidad por temas de autonomía. Una vez esté dispuesta, se amarrará el modelo para que no vaya a la deriva.
- Posteriormente se realizarán los calibrados en la sonda. Este calibrado se ha de realizar a diferentes alturas de la sonda cuando el agua que se encuentre en el canal esté completamente tranquila. La sonda servirá para saber cuáles son realmente las alturas que la pala está generando, ya que pueden existir desviaciones con respecto a lo que la pala está realizando. La sonda se colocará en un carro dispuesto en el centro del canal.

Todos los elementos que haya que calibrar también necesitan saber la altura del canal en el momento en el que se realizan las experiencias. El canal se mantiene constante en una altura cercana a 1,8 metros, aunque es posible que pierda una cantidad de agua entre días.



Figura 3.48 Pala generadora de olas y carro dispuesto en el centro del canal

Ha de notarse que entre las diversas pruebas realizadas en el canal y las operaciones de prueba tiene que esperarse un tiempo a que el agua se encuentre en calma. Los instrumentos de medición de movimiento del buque y de generación de las olas son extremadamente sensibles, por lo que es necesario que las medidas sean claras. Los comportamientos también cambian si existen perturbaciones aleatorias en el canal.

En cuanto a la colocación del modelo, éste se sitúa en la zona central del canal, próximo al carro donde se encuentra la sonda que medirá la veracidad de las olas. Idealmente, esta sonda tendrá que situarse donde se sitúa el modelo. Para evitar que el modelo vaya a la deriva, es necesario atarlo a las paredes del canal, utilizando unas cuerdas finas atadas a los raíles. Con el fin de que no se produzca un tirón en el momento en el que se llegue al límite de las cuerdas cuando las olas arrastren al buque modelo, se han incorporado unas gomas que reducirán en gran medida el efecto.

Una vez realizadas las pruebas y colocado el modelo, es posible comenzar con los ensayos. Un software intuitivo controla la pala e indica las características de la ola a realizar. Los parámetros que necesita para realizar la ola son período y altura de ola, valores establecidos en el momento en el que se elige la frecuencia y la pendiente de la ola. Los ensayos a realizar serían los siguientes:

H_ola	T_ola	Pendiente	Ratio	H_ola	T_ola	Pendiente	Ratio
0,0321	1,014	1:50	1,7	0,03867	0,862	1:30	2
0,02843	0,9543	1:50	1,81	0,03681	0,841	1:30	2,05
0,02536	0,9012	1:50	1,92	0,03507	0,8209	1:30	2,1
0,02427	0,8817	1:50	1,96	0,06427	0,9074	1:20	1,9
0,023755	0,8722	1:50	1,98	0,06102	0,8841	1:20	1,95
0,02325	0,8629	1:50	2	0,05801	0,862	1:20	2
0,02277	0,8538	1:50	2,02	0,05521	0,841	1:20	2,05
0,0535	1,0139	1:30	1,7	0,05262	0,821	1:20	2,1
0,0474	0,9543	1:30	1,81	0,0502	0,8019	1:20	2,15
0,04228	0,9012	1:30	1,92	0,09549	0,9578	1:15	1,8
0,04135	0,8914	1:30	1,94	0,0857	0,9074	1:15	1,9
0,03959	0,8722	1:30	1,98	0,08136	0,8841	1:15	1,95
0,0775	0,8629	1:15	2	0,07734	0,862	1:15	2
0,07015	0,821	1:15	2,1	0,0736	0,841	1:15	2,05
0,06693	0,8019	1:15	2,15	0,02105	0,821	1:50	2,1
0,02209	0,841	1:50	2,05	0,08418	0,821	1:15	2,1
				0,092808	0,862	1:15	2

Una vez se ha indicado a la pala que realice la ola en concreto, se recogen los datos en un portátil con el software correspondiente. Se obtendrán las mediciones de la sonda y las mediciones de la IMU. El procesado de los datos posterior será similar al que se realizó para la experiencia de decaimiento, con la misma metodología.



Figura 3.49 : Modelo dispuesto en el canal

En este caso, el software que recoge los datos de la unidad será el XSens MT Manager. Es necesario introducir en el software de recogida de datos la frecuencia de muestreo de la unidad, así, como otros parámetros para realizar las lecturas.

La frecuencia de muestreo de la unidad es un parámetro muy importante. Utilizar una frecuencia demasiado alta puede provocar pérdida de datos cuando la IMU manda por señal de radio los paquetes de datos al ordenador portátil. Utilizar una frecuencia pequeña, por el contrario, puede no simular de manera correcta los movimientos del buque. Para este tipo de ensayos siempre se ha considerado una frecuencia de 50 Hz.

Los ensayos realizados orientan el modelo hacia la generación de olas para que éstas lo encuentren de proa. Realizándose a una velocidad nula, la frecuencia de encuentro de las olas con el modelo será igual a la indicada en la pala. Al tratarse de un canal pequeño en el que los ensayos se ven perturbados por el rebote en un máximo de dos minutos, es necesario excitar el modelo mediante una fuerza que lo escora lateralmente, para poder ver los efectos de la resonancia más rápidamente.

Con esta escora “artificial”, al modelo pueden pasarle dos cosas:

- Se encuentra en una frecuencia en la que no se produce resonancia paramétrica, por lo que la escora lateral va amortiguándose hasta que sólo quede el movimiento de cabeceo.
- Se encuentra en una frecuencia que produce resonancia paramétrica. El buque no será capaz de disipar el movimiento y, en algunos casos, se incrementará el balance dando lugar a un claro efecto de resonancia.

A continuación se pueden ver dos gráficas que representan los movimientos en el grado de libertad de balance extraídos de dos ensayos diferentes realizados:

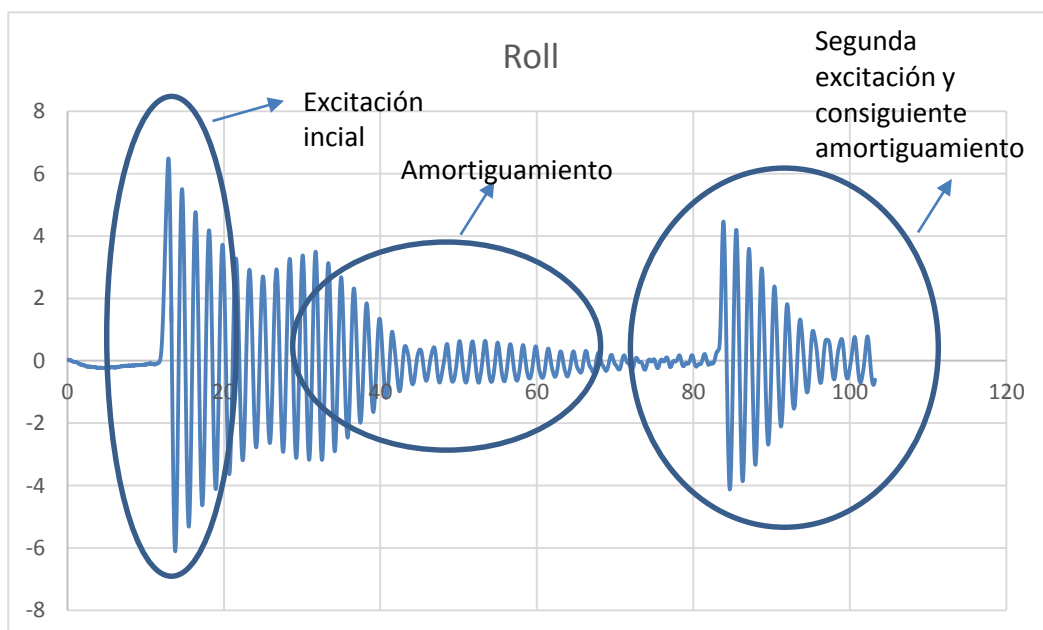


Figura 3.50 Ensayo en el canal sin resonancia

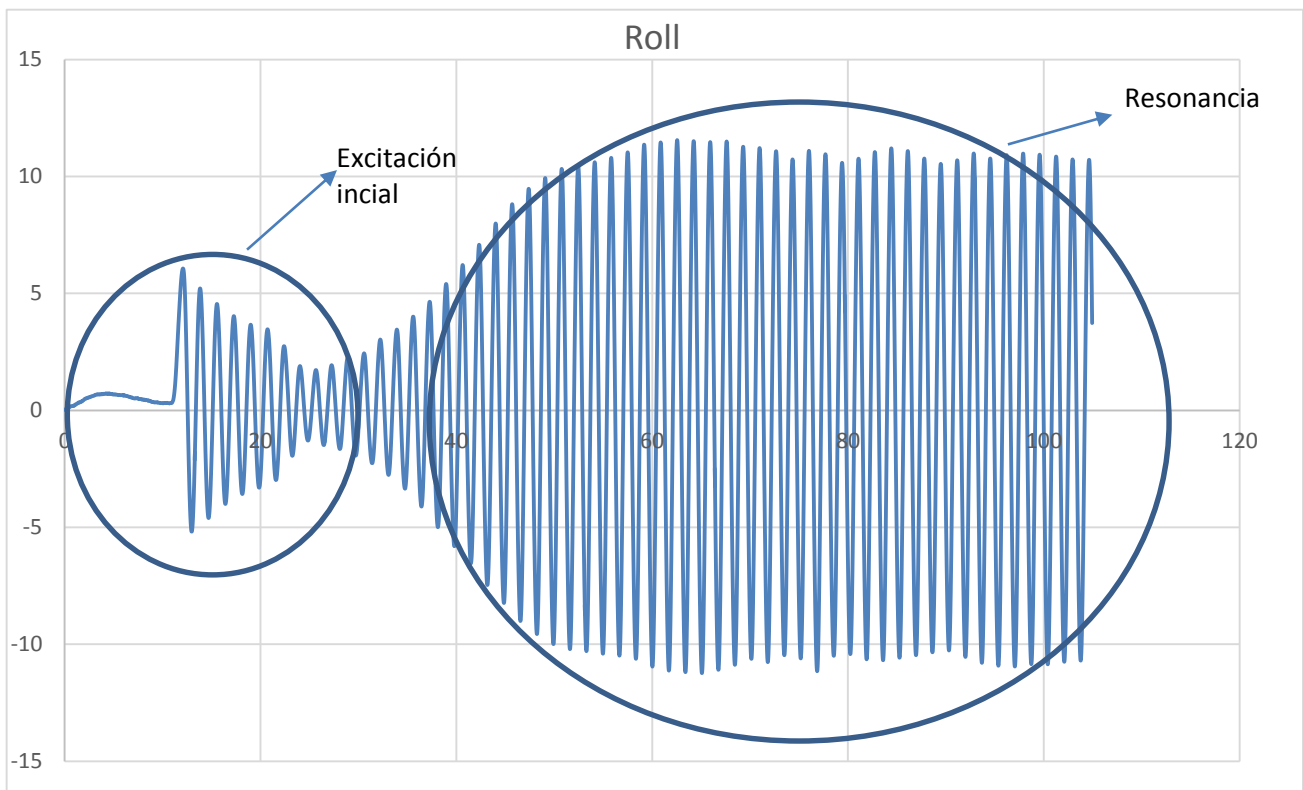


Figura 3.51 Ensayo en el canal con resonancia

En la primera de las gráficas (gráfica 3.50) se pueden ver diversas partes diferenciadas. Al inicio de las mediciones, antes de que las olas se encuentren con el buque, se realiza una excitación que aumenta su escora hasta 6 grados, movimiento que se disipa debido al amortiguamiento y el coeficiente recuperador. Posteriormente, se encuentra una excitación algo mayor de lo que se veía anteriormente, debido al encuentro con las olas.

Aun así, el movimiento se amortigua en su totalidad. Nótese que las mediciones que tienen un muestreo muy pequeño no generan un movimiento sinusoidal. Por ello, se pueden ver unas curvas no sinusoidales al final del amortiguamiento. Una segunda excitación constata que el ensayo no se realiza a una frecuencia resonante (este segundo movimiento se amortigua, igual que el primero)

En caso de la segunda gráfica (gráfica 3.51), el comportamiento es muy diferente. Al igual que en la primera, se encuentra una excitación inicial al comienzo del ensayo. En el momento en el que la ola encuentra al buque, se mantiene parcialmente y comienza a ascender. Esta escora llega hasta un valor de 12 grados, momento en el que la energía que disipa el sistema es igual a la transmitida por la excitación paramétrica, resultando en un régimen permanente. En este caso, la altura ola es relativamente baja, por lo que no se genera una escora muy pronunciada. Este valor se vería aumentado si la excitación producida por las olas de proa fuese mayor.

Se han realizado un total de 33 ensayos.

3.2.4 Resultados

A continuación se analizarán los resultados de los datos extraídos de los ensayos. En las primeras experiencias realizadas no existe excitación externa en el grado de balance, por lo que las lecturas de las IMUs si no existe resonancia se vuelven un tanto erráticas (al tratarse de ángulos tan pequeños, del orden de décimas de grado, el dispositivo no es capaz de medir con claridad).

De los 33 ensayos que se han realizado en el canal, un total de 12 han mostrado comportamientos de resonancia, manteniendo la excitación inicial y aumentándola a medida que se desarrollaba la experiencia. Estos ensayos se comprenden entre los ratios 1,98 y 2,1.

H_ola	H_real	T_ola	Ratio	Pendiente	Nº
0.03959	0.04827	0.8722	1.98	1:30	12
0.0775	0.07629	0.8629	2	1:15	13
0.03867	0.03802	0.862	2	1:30	14
0.03681	0.03905	0.841	2.05	1:30	15
0.05801	0.05849	0.862	2	1:20	19
0.05521	0.07586	0.841	2.05	1:20	20
0.05262	0.04373	0.821	2.1	1:20	21
0.07734	0.06817	0.862	2	1:15	26
0.0736	0.09672	0.841	2.05	1:15	27
0.07015	0.06879	0.821	2.1	1:15	28
0.08418	0.07532	0.821	2.1	1:15	32
0.092808	0.08568	0.862	2	1:15	33

Estos ensayos están comprendidos entre las pendientes 1/30 y 1/15 por ser las realizables en el canal de experiencias mencionado anteriormente. Si se toman los datos de las IMUs y se realiza una representación gráfica, se pueden observar gráficas como las siguientes (para las pendientes 1:15):

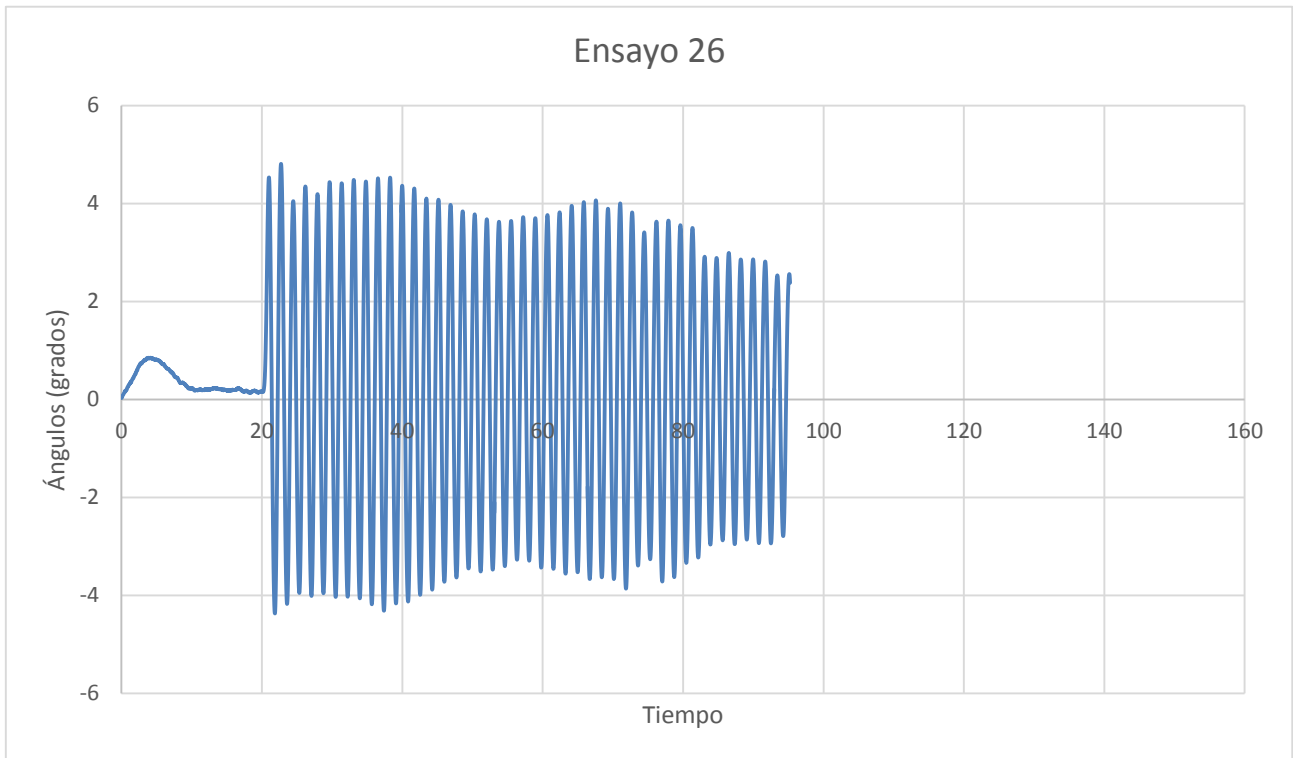


Figura 3.52 Ensayo 26, pendiente 1/15 y ratio 2

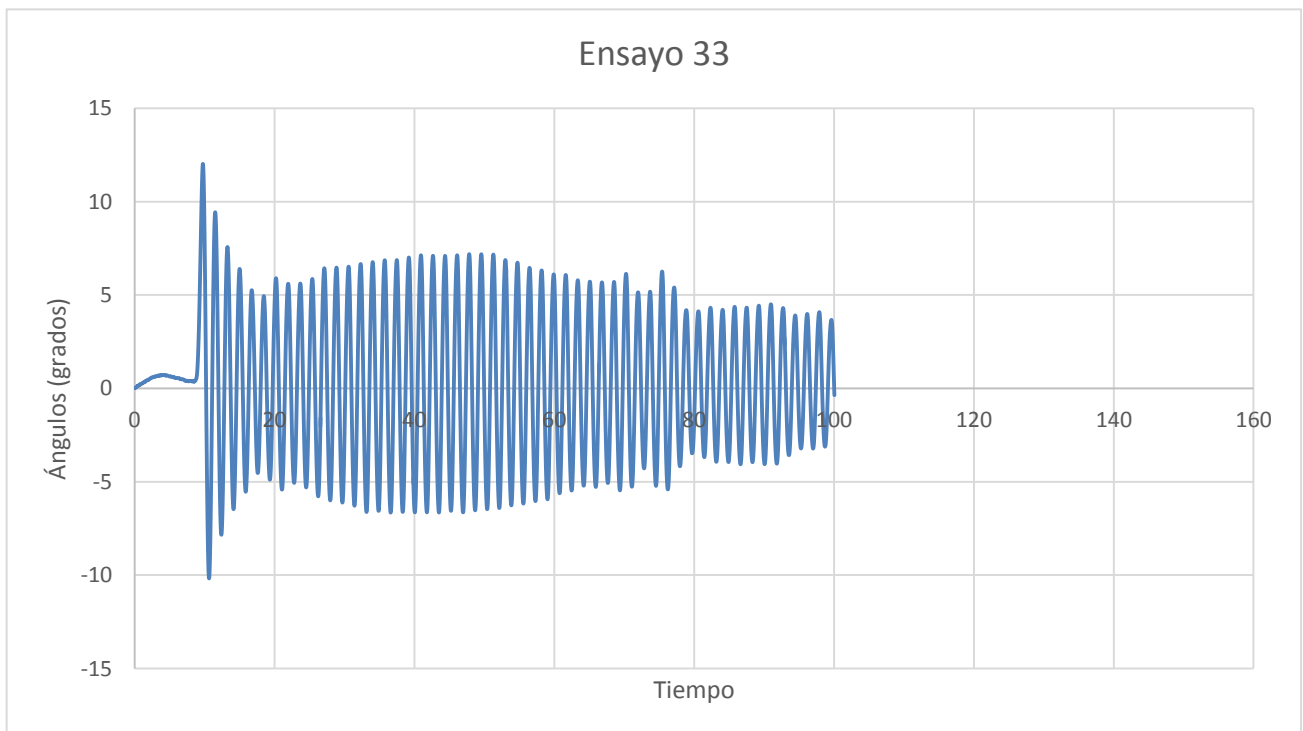


Figura 3.53 Ensayo 33, pendiente 1/15 y ratio 2,05

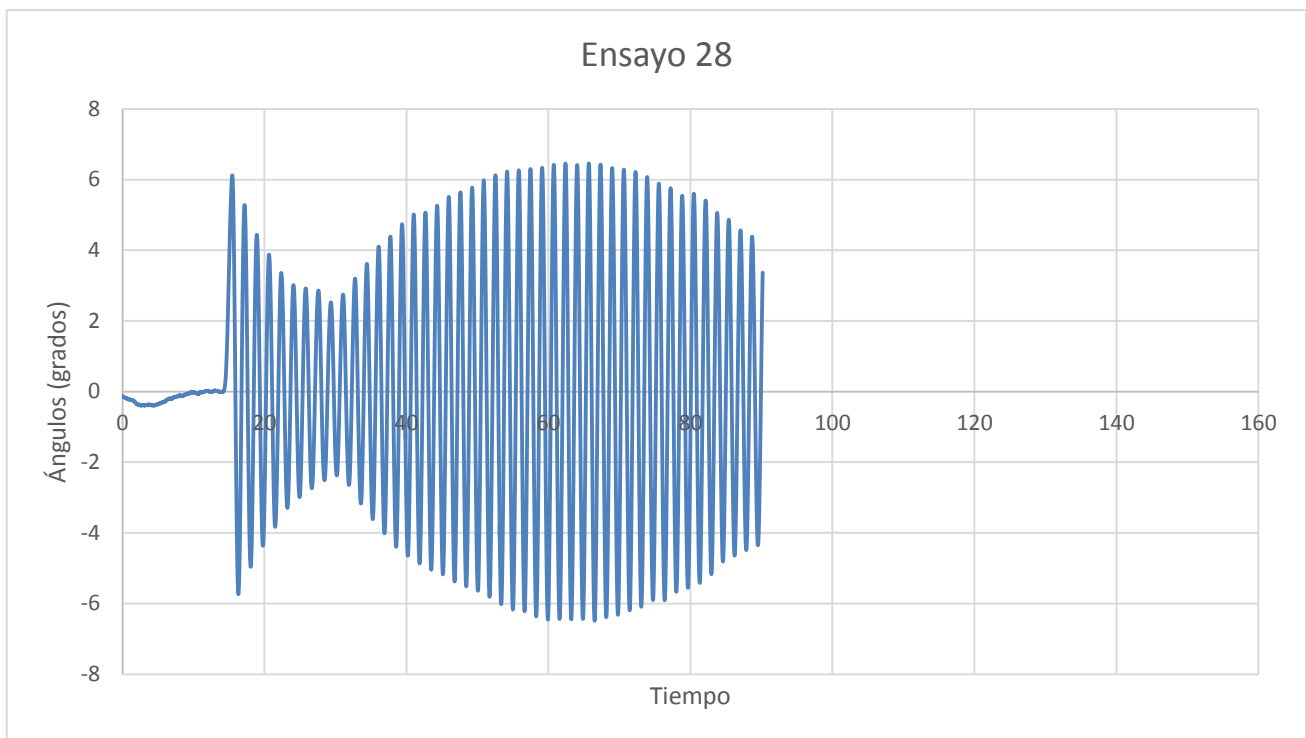


Figura 3.54 Ensayo 28, pendiente 1/15 y ratio 2,1

En los ensayos, como anteriormente se ha explicado, se introduce una excitación para observar la resonancia. Una vez las olas comienzan a rebotar en el final del canal y perturban el ensayo modificando la ola incidente, se corta el ensayo.

En los ensayos se puede ver un claro periodo de resonancia. Una vez se ha realizado la excitación y ésta entra en fase con el aumento de balance debido a la ola incidente, se observa un aumento en la escora. Una vez el mar se ha desarrollado, no se toman más medidas.

Se puede observar en las tres figuras una disminución del ángulo de escora en la zona de resonancia una vez se ha desarrollado el mar. Esto se debe principalmente al posible rebote que existe en las olas con la estructura del canal, modificando después de un tiempo la ola generada. También influye el rebote de las olas generadas por el modelo al ser excitado. Este fenómeno también se debe al ratio al que se realiza. Al observar las dos últimas gráficas, se ve que, a medida que aumenta el ratio, más lo hace el efecto de reducción comentada.

Si se observa la cantidad de ensayos que se ha realizado, existen varios con el mismo ratio y la misma pendiente (ratio 2 o 2,5 y pendiente 1/15). Se ha realizado los mismos ensayos teóricos, pero de forma diferente:

- Cambiando ligeramente la frecuencia (ensayos a 1,9979 en vez de 2)
- A pendiente teórica 2 (considerando que se ha realizado una pendiente de 1/15)
- A pendiente real 2

Estos casos varían ligeramente las frecuencias, pero los resultados son muy diferentes. La diferencia entre pendiente real y teórica se debe al fallo en altura que se mide en las galgas de la pala.

Una vez se ha indicado la ola a realizar, la pala se mueve para obtener la ola resultado. Sin embargo, la función de corrección obtenida en las galgas cuando se realizan las operaciones de calibrado no es exacta. La pala realizará una ola con la altura indicada medida por sus galgas. Esta altura tiene un porcentaje de error en los ensayos que va desde un 5% en los mejores casos hasta un 35% en los peores.

Por ello, se han decidido repetir algunos ensayos para obtener las pendientes reales igual a las pendientes teóricas. Por ejemplo, si introducimos los datos del ratio de frecuencia 2,1 y pendiente 1/15, en el caso realista obtenemos el siguiente resultado:

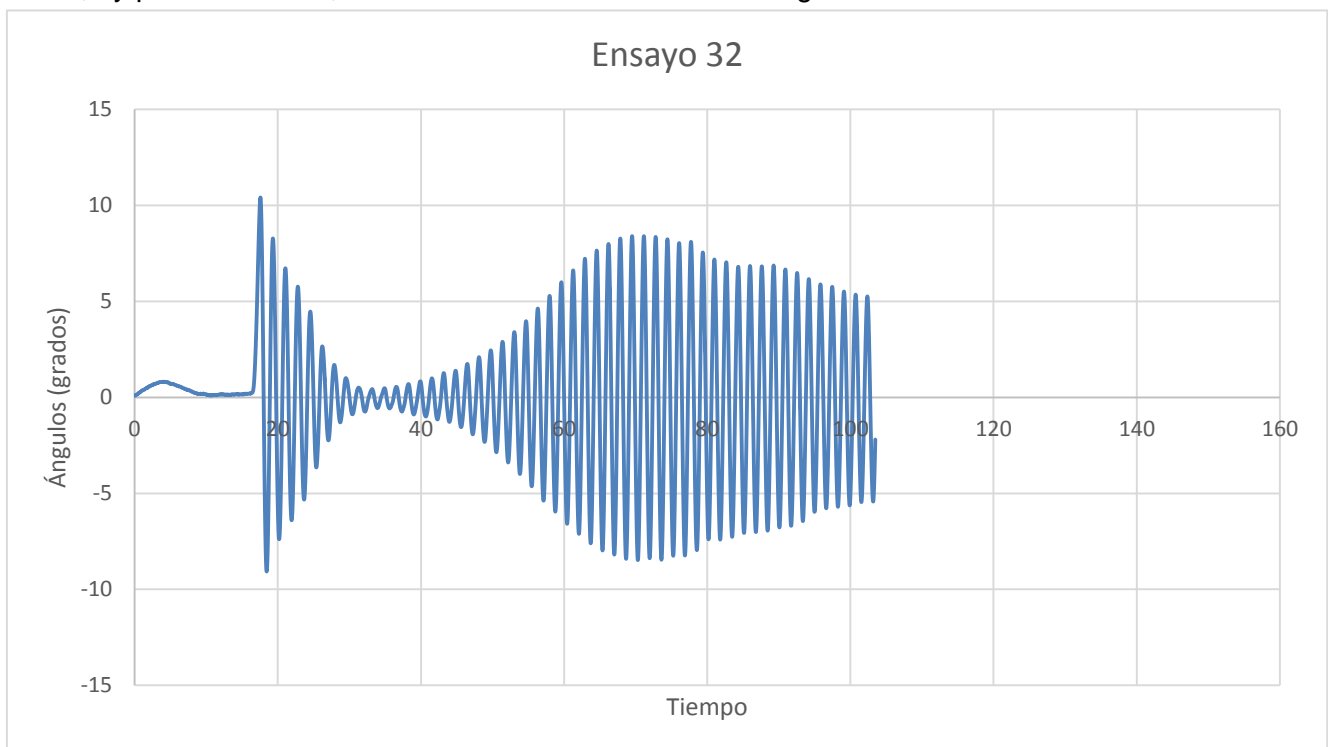


Figura 3.55 Ensayo 32, pendiente 1/15 y ratio 2,1

En el ensayo 28 se podía observar una altura media de 5,6 centímetros, siendo la altura teórica para obtener una pendiente 1/15 de 7,015 centímetros (un error de un 20%). En este comportamiento se ve un ángulo máximo de 6,46 grados en el régimen permanente, con un claro caso de resonancia paramétrica.

En el ensayo 32 se realiza el ensayo con una altura de 7,12 centímetros, con un error de un 2% con respecto al valor que se quiere obtener. El comportamiento observado es similar, pero la amplitud es mayor. En este caso, el valor máximo del ángulo en régimen permanente es de 8,39 grados.

El ángulo máximo registrado se ha producido a un ratio 2,05 en uno de los ensayos de pendiente 1/15. Este valor máximo entra dentro de los valores esperados. Se trata del ensayo en el que se produce la mayor altura de ola a una frecuencia muy cercana a la frecuencia problemática.

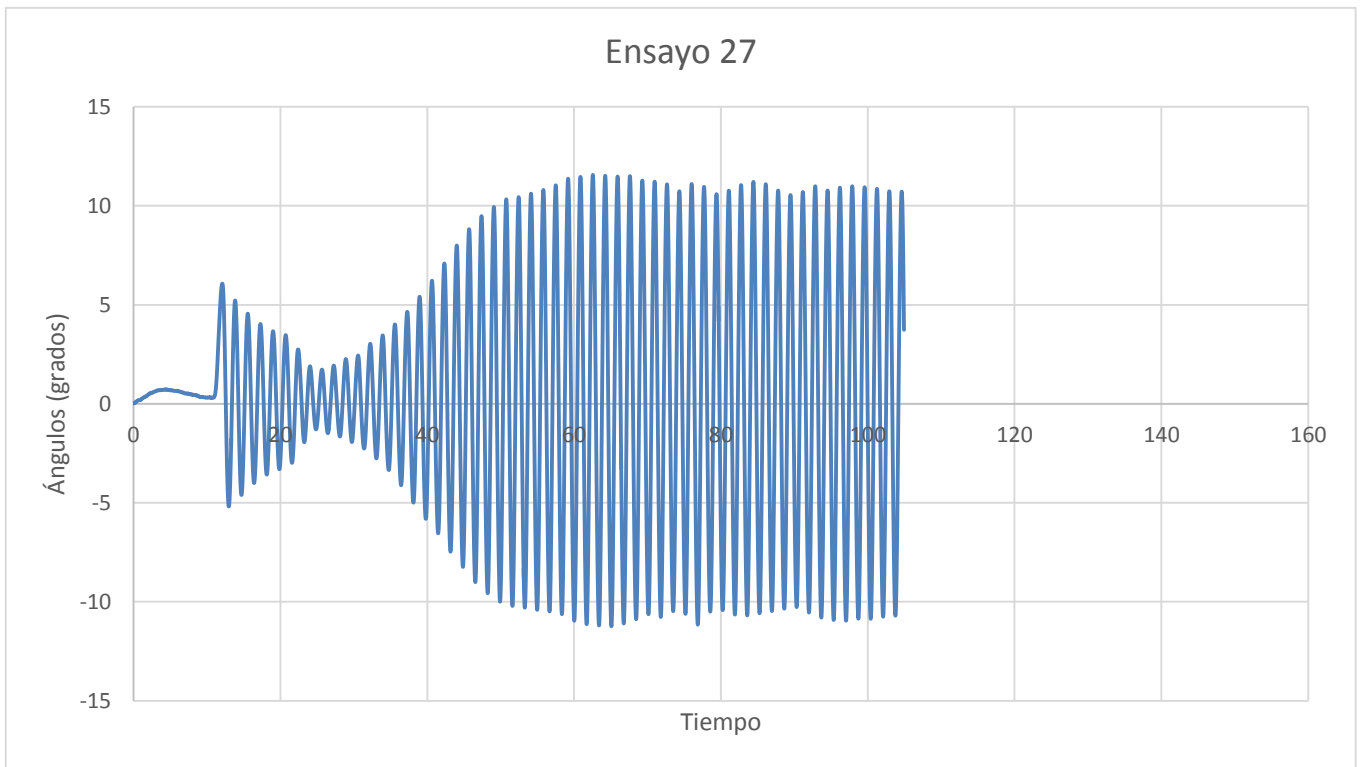


Figura 3.56 Ensayo 27, pendiente 1/15 y ratio 2,05

En cuanto a los ensayos realizados que no han mostrado resonancia, tan sólo se pueden observar los valores de excitación inicial y el consiguiente amortiguamiento. A pesar de no mostrar resonancia, son valores necesarios para verificar que el modelo matemático se comporta de manera próxima a la realidad y para constatar que no se produce el fenómeno a la frecuencia y pendiente consideradas. Por ejemplo, uno de los ensayos anteriormente descritos sería el siguiente:

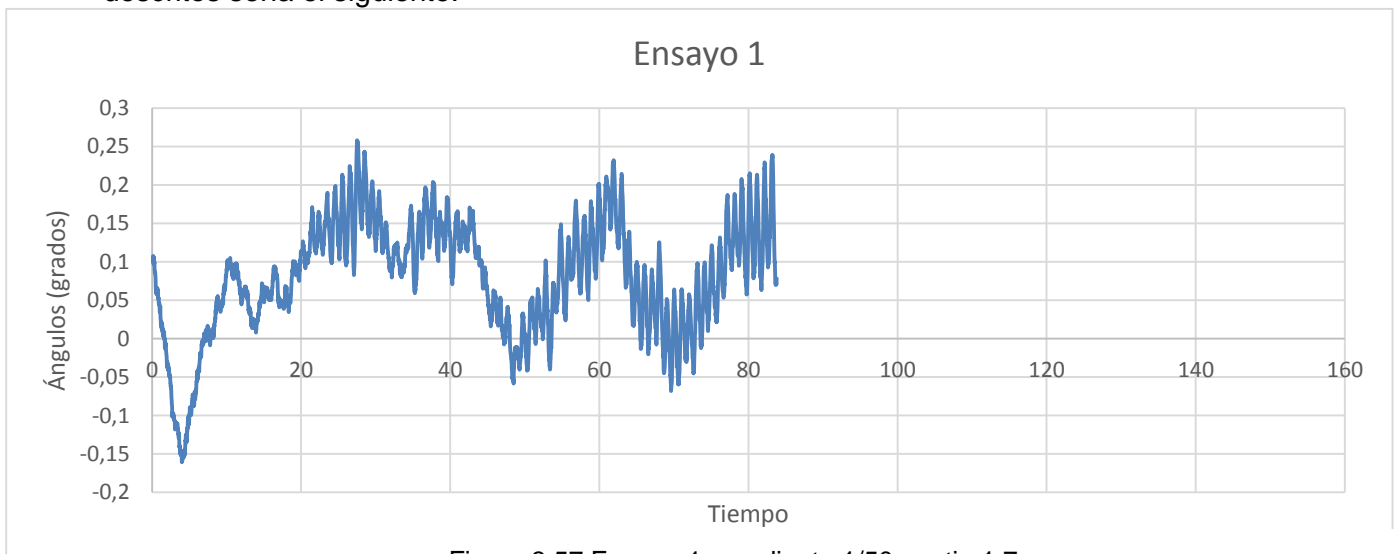


Figura 3.57 Ensayo 1, pendiente 1/50 y ratio 1,7

A continuación se puede observar unas imágenes que se corresponden con un ensayo en el que se muestra resonancia. Si se representan diversas imágenes del ensayo desarrollado en el tiempo, se puede observar cómo el modelo comienza a desarrollar un movimiento de escora propio de la resonancia:

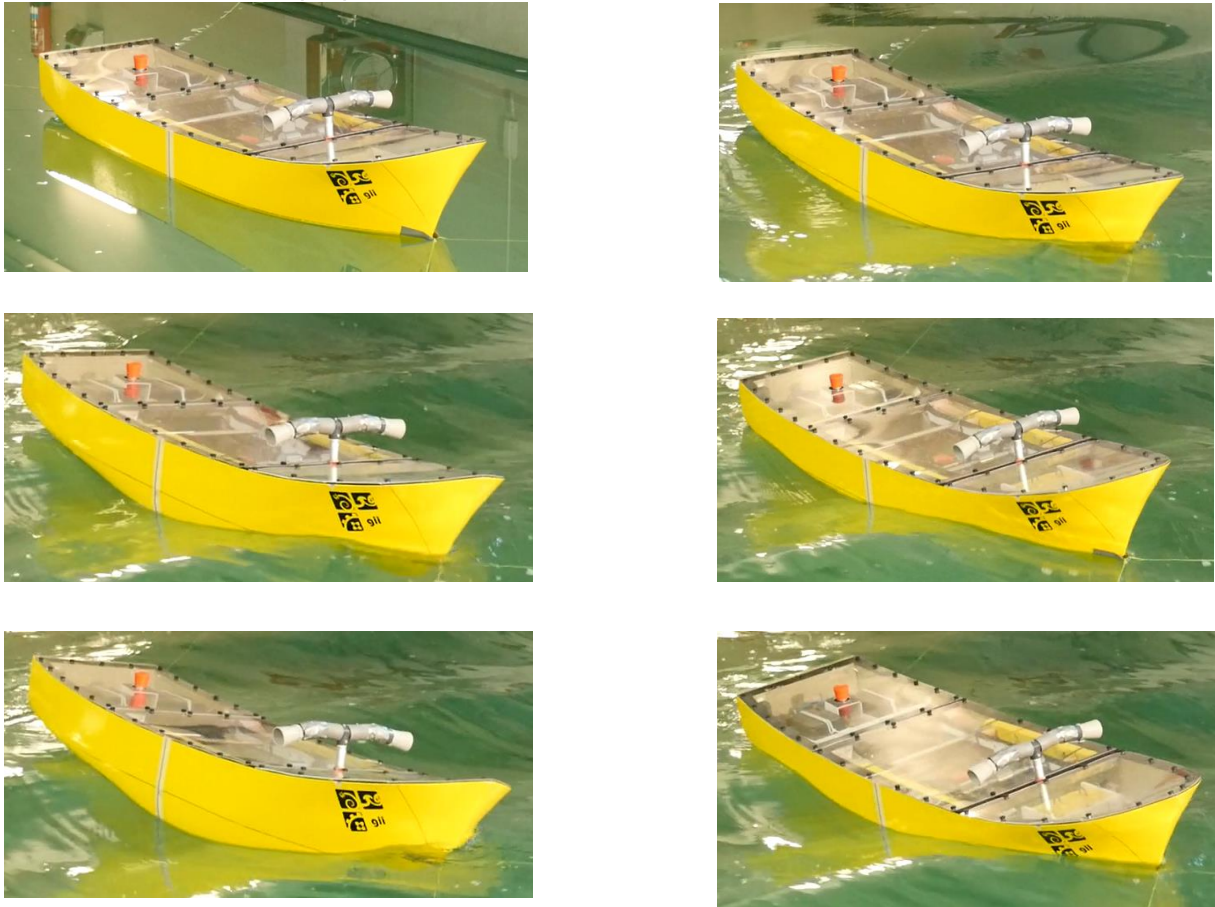


Figura 3.58 Imágenes de ensayo en canal

Como se puede observar en las imágenes, se desarrolla un movimiento de amplitud que va aumentando a medida que avanza el tiempo (imágenes de derecha a izquierda, de arriba a abajo). Estas imágenes corresponderían al ensayo número 27, ya referenciado en otras gráficas.

3.3 Comparación entre resultados obtenidos

Ahora que todos los resultados han sido analizados individualmente, con sus diversas particularidades, se realizará un análisis y comparativa entre ellos. Se realizarán las siguientes comparaciones:

- Ensayo con modelo matemático simplificado
- Ensayo con modelo matemático no lineal
- Ensayo con resultados de análisis anteriores (referenciados en [5])

3.3.1 Resultados ensayo – modelo matemático simplificado

Para realizar las diferentes comparaciones entre el modelo matemático simplificado y los ensayos realizados, primero se han de normalizar todos los resultados de los ensayos en canal. Esto se refiere a retirar las partes que no correspondan con el régimen permanente de comportamiento del modelo.

Para ello, se realizará una operación similar a la realizada en el ensayo de decaimiento, explicado en apartados anteriores. En este ensayo se eliminaba la parte correspondiente a la excitación, ya que no refleja el comportamiento real del buque. De esta manera, el ensayo 27 que se presentaba en apartados anteriores quedaría:

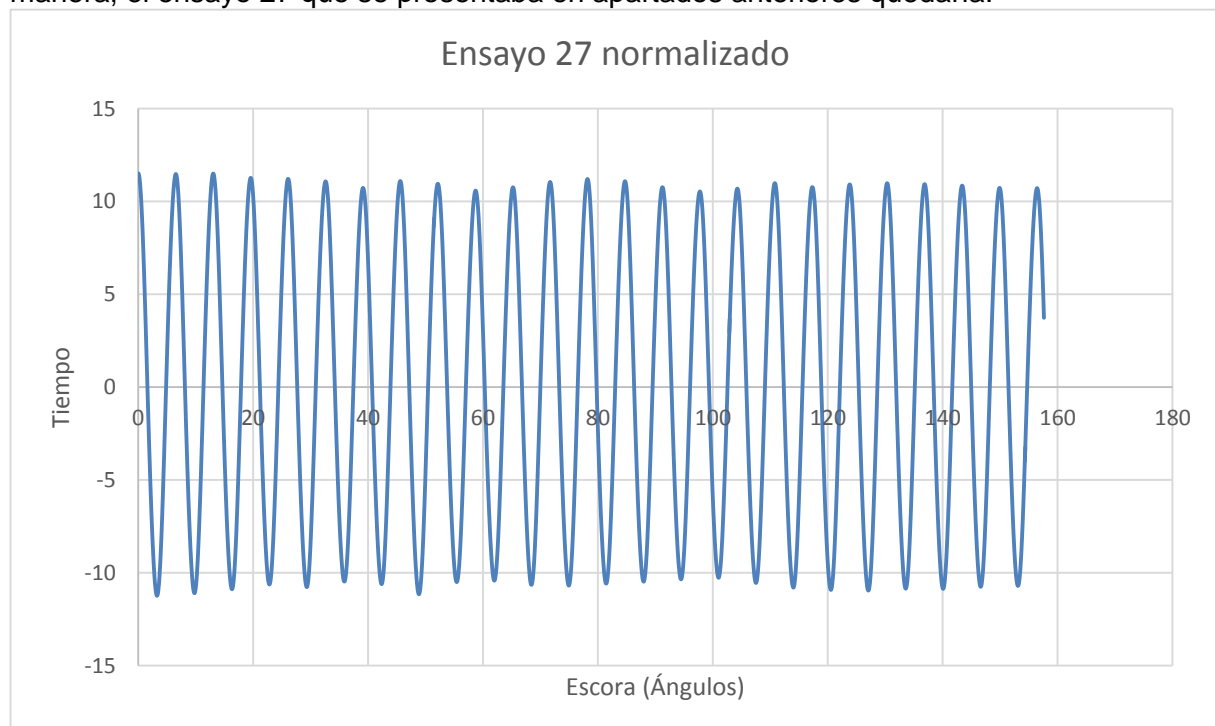


Figura 3.59 Ensayo 27 normalizado

Además de escoger los intervalos de régimen permanente en los ensayos realizados, también es necesario hacerlo para el modelo matemático. Como se ha explicado anteriormente, el modelo matemático simula una pequeña excitación (de un grado de amplitud) y desarrolla el movimiento. Es necesario deshacerse de este intervalo de resultados en los que aún se está formando el fenómeno de resonancia paramétrica y se encuentra en régimen transitorio. La operación sería similar a la realizada en los primeros análisis, donde se escogía un intervalo concreto de segundos del final de la simulación.

Otra de las operaciones a realizar para comparar los resultados es la de unificar medidas. Debido a que los ensayos se realizan con un modelo escalado, es necesario escalar el tiempo en las oscilaciones. Para ello, se han de multiplicar todos los datos de tiempo del modelo por la raíz de la escala, para obtener los valores de tiempo en los que se produce la oscilación.

Una vez realizada la escala de tiempos, se ha de considerar un intervalo de tiempo para ambos resultados, matemático y físico. Se escogerá un intervalo de 275,75 segundos (ya que hasta este momento existen datos en la gran mayoría de los ensayos en los que se incurre en resonancia), con un paso de 0,05 segundos por dato. Se ha de generar un script auxiliar para obtener la matriz de ensayos que se corresponda con este intervalo (mediante el comando "interp2" ya utilizado anteriormente, se obtiene una matriz interpolada que tiene datos en cada uno de los puntos considerados). Este script será adjuntado posteriormente como anexo (Anexo 11).

Si se realiza una representación del ensayo 27 con el generado por el modelo matemático (pendiente 1/15, ratio 2,05), se observa la siguiente figura:

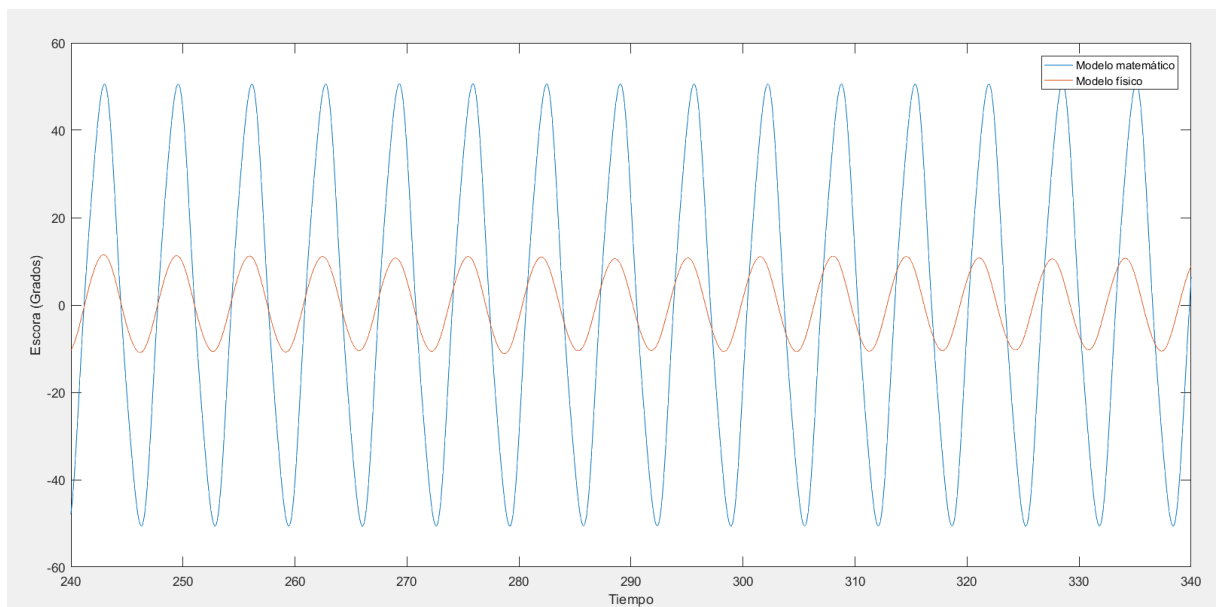


Figura 3.60 Comparaciones ensayo 27

Como se puede observar, para este ensayo se produce un comportamiento similar para el modelo matemático y para el modelo físico. Sin embargo, las amplitudes son muy diferentes. En el modelo matemático existe una amplitud de 50 grados, mientras que las experimentaciones en canal muestran un valor real de 12 grados. La superioridad del modelo matemático simplificado se debe al efecto comentado anteriormente con respecto a los valores de altura metacéntrica. Al utilizarse este valor, el aumento del mismo es muy acusado, amentando a medida que aumenta el movimiento de escora.

También se puede intuir un muy pequeño desfase en el modelo físico con respecto al matemático. Podría deberse a cómo se realiza el modelo matemático, por lo que se considerará un error muy pequeño que no tendrá repercusiones reales en la modelación

A continuación se pueden observar otras comparaciones de los diversos ensayos realizados y sus correspondientes generaciones en el modelo matemático:

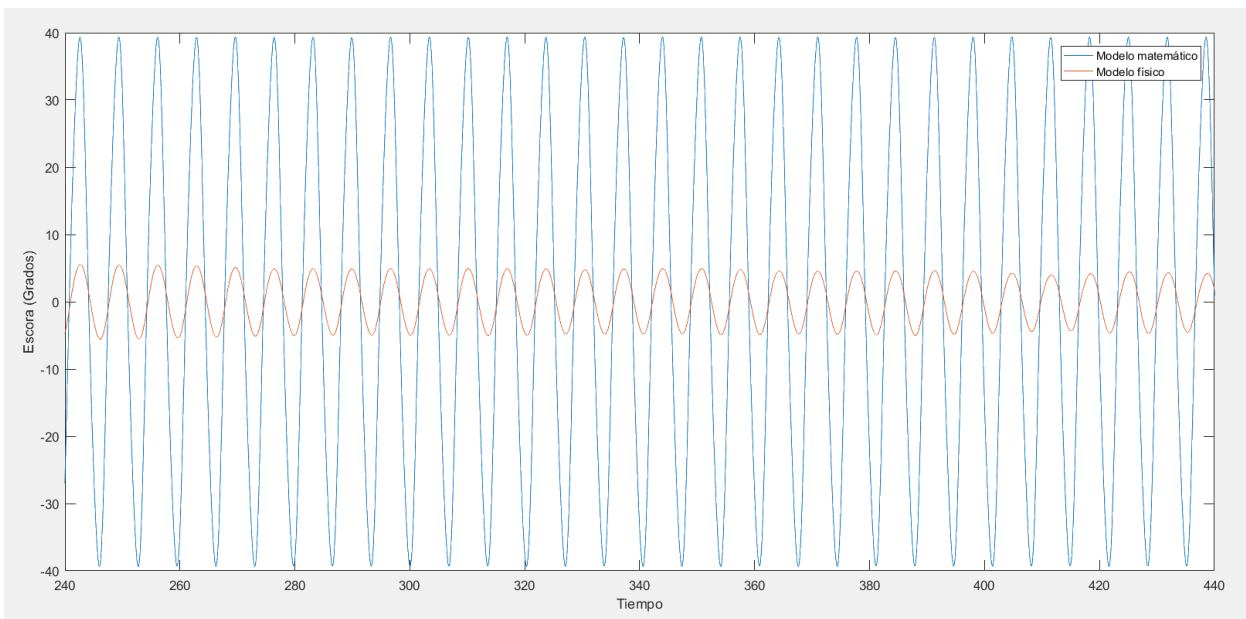


Figura 3.62 Comparaciones ensayo 12 (Pendiente 1/30, Ratio 1,98)

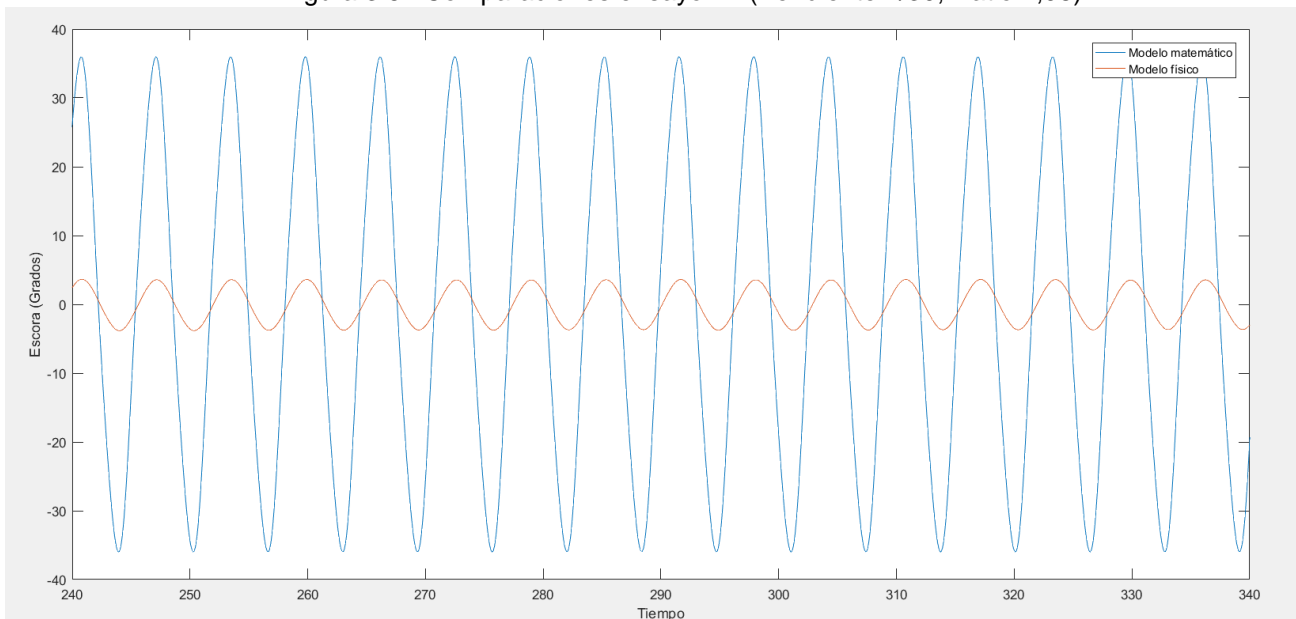


Figura 3.61 Comparaciones ensayo 21 (Pendiente 1/20, Ratio 2,1)

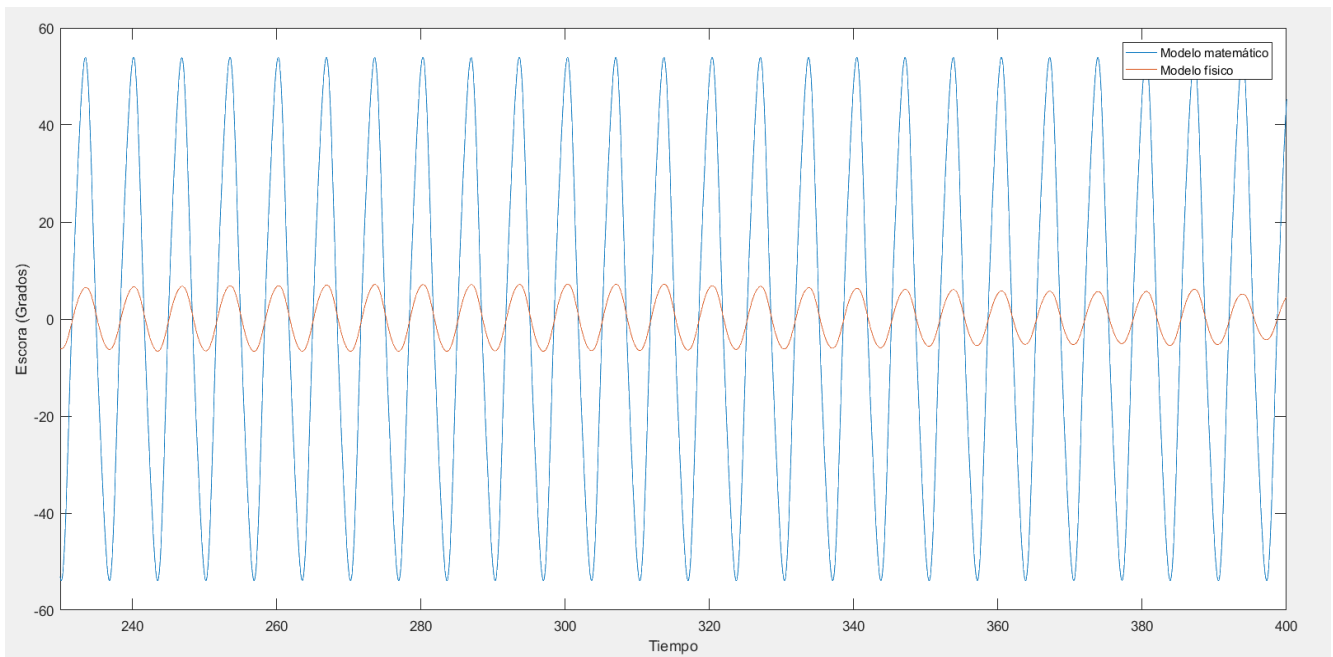


Figura 3.63 Comparaciones ensayo 33 (Pendiente 1/15, Ratio 2)

Como se puede observar, todas las gráficas representadas indican un modelo matemático que obtiene resultados de amplitud muy por encima de los registrados de forma física. La influencia de la altura metacéntrica en el modelo es mucho menor a la predicha. También hay que notar que este modelo simplificado incurre en la simplificación de pequeños ángulos, por lo que es normal que exista un error muy grande (sobre 5 veces más de lo registrado físicamente)

En cuanto a los ensayos que no muestran resonancia:

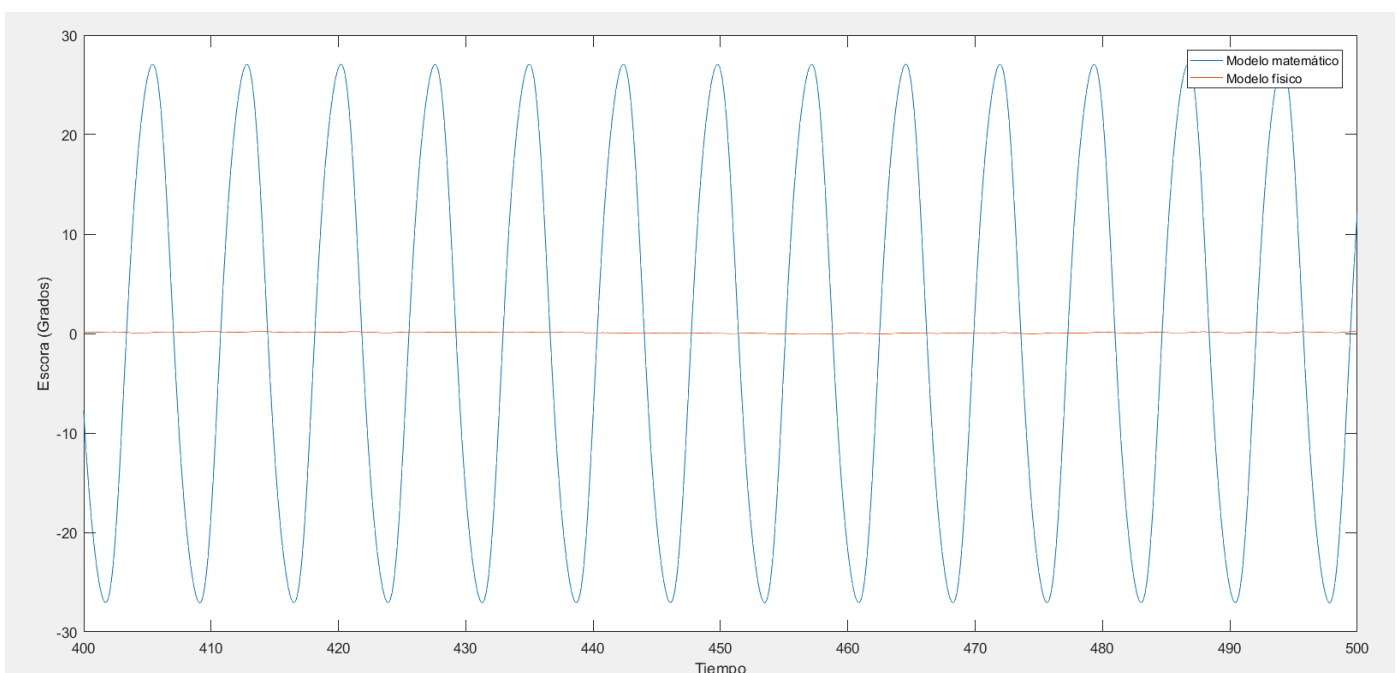


Figura 3.64 Comparaciones ensayo 1 (Pendiente 1/50, Ratio 1,7)

En la gráfica anterior (Figura 3.64) se puede observar que el modelo matemático representa valores totalmente diferentes con respecto al físico, mostrando un caso claro de resonancia paramétrica que no se produce en los ensayos en canal.

A continuación se puede observar la comparativa de los valores máximos de amplitud con respecto al intervalo de frecuencias realizado. Para ello, el modelo físico se ha de representar como el modelo matemático, utilizando los valores máximos de amplitud en los intervalos de régimen permanente (aunque, en algunos casos, un tanto difuminados). La representación para los valores de pendiente 1/50 es la siguiente:

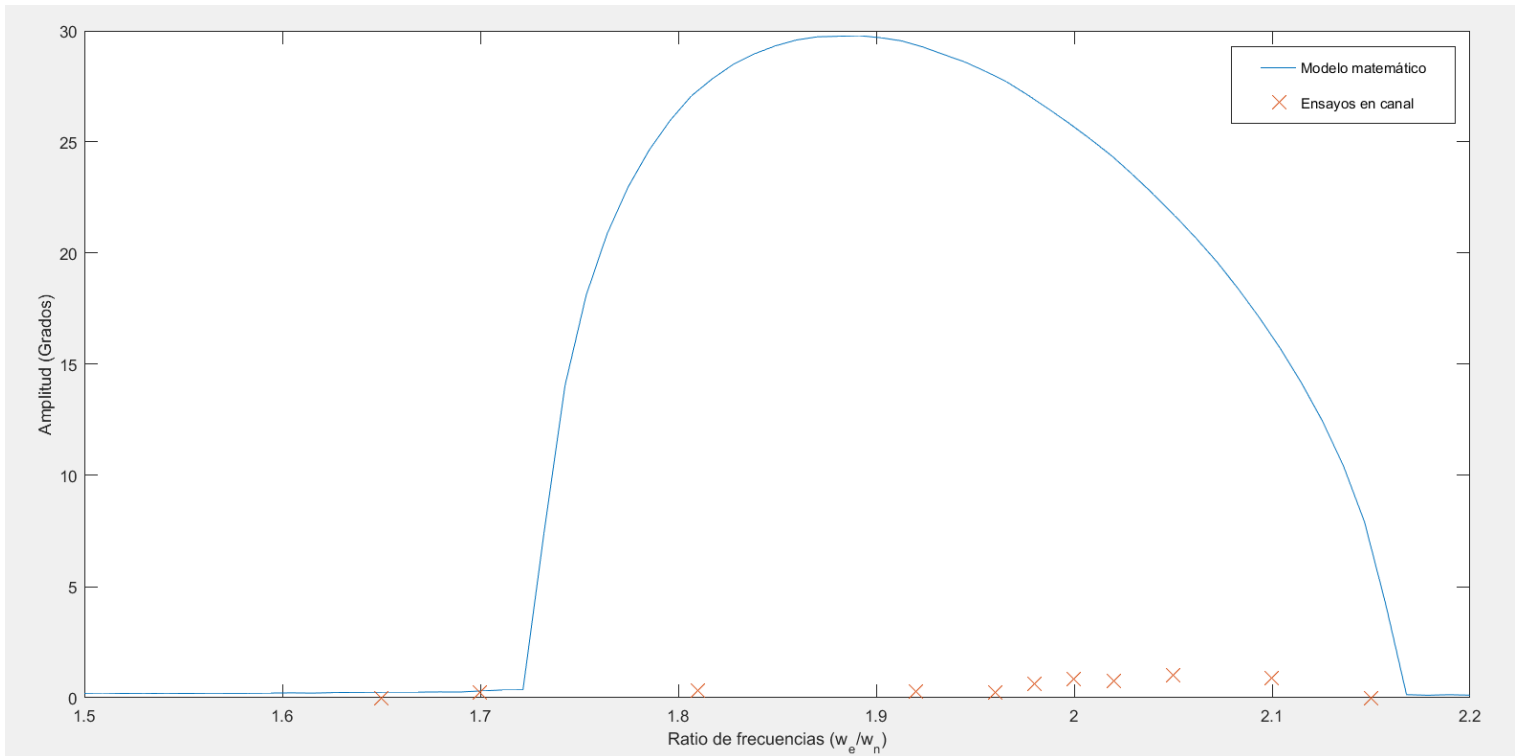


Figura 3.65 Máximos de pendiente 1/50

Como se puede observar, el comportamiento del modelo matemático no se corresponde. Además de las simplificaciones comentadas anteriormente, los valores de altura de las olas en la pendiente 1/50 son muy bajos, por lo que casi no producen variación ni movimiento en el buque. Aun así, se puede observar una tendencia de valores mayores en las zonas cercanas al valor en el que se produce resonancia.

Esta comparación será mejorada en el próximo modelo matemático, incurriendo en valores de amplitud menores. Si se observan las gráficas para las pendientes posteriores (1/30, 1/20, 1/15), la tendencia es relativamente similar, con valores de amplitud mucho mayores en el modelo y una pequeña tendencia en el caso de los ensayos en canal:

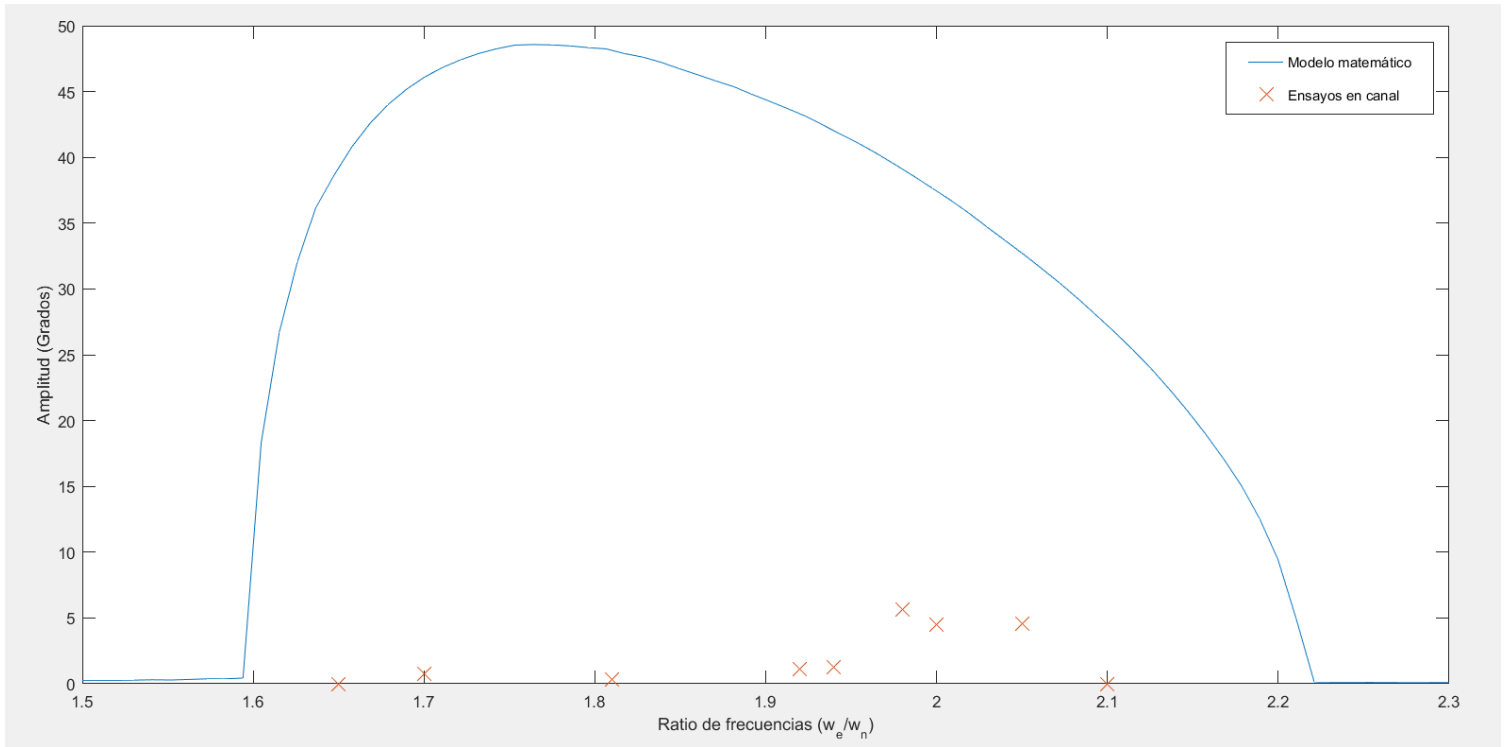


Figura 3.66 Máximos de pendiente 1/30

Nótese que, a pesar de que parece una representación similar, la amplitud máxima ha aumentado, y de la misma manera lo han hecho los valores de las experiencias (en la figura 3.66 se observaba un valor máximo de 30 grados, mientras que en ésta se encuentra un valor de 50. En caso de los ensayos, el valor máximo anterior es de 1 grado, siendo en la gráfica actual de 5).

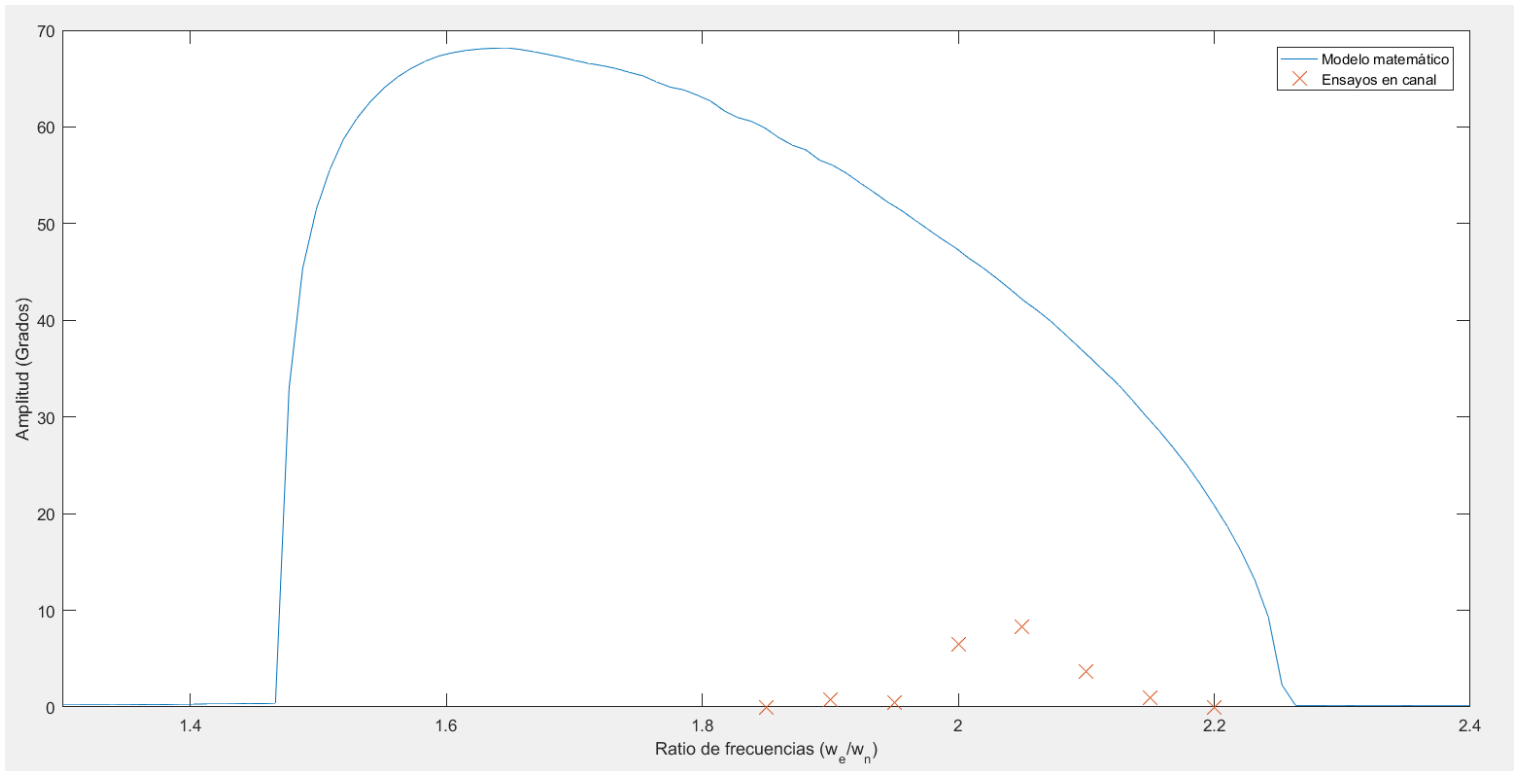


Figura 3.67 Máximos de pendiente 1/20

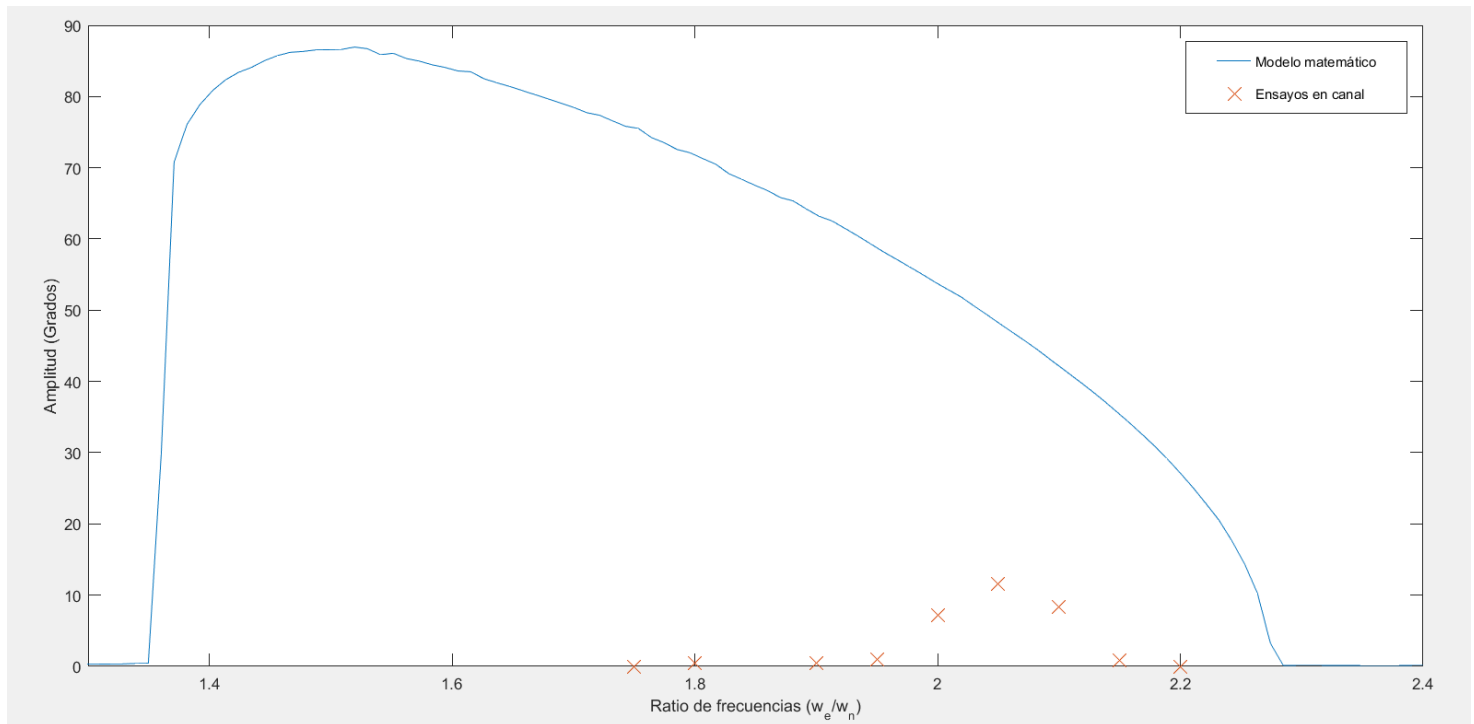


Figura 3.68 Máximos de pendiente 1/15

Se ha utilizado un script auxiliar de resultados para obtener los valores a representar de los ensayos. Este script será adjuntado de forma anexa a este trabajo (Anexo 11).

3.3.2 Resultados ensayo – modelo matemático no lineal

Con el modelo matemático no lineal se utilizarán las mismas consideraciones que para el modelo matemático simplificado (utilizando tan sólo los intervalos de tiempo que correspondan a los periodos de régimen permanente).

Comparando los ensayos del modelo físico con el matemático se obtienen las siguientes representaciones, las cuales se acercan mucho más a las consideradas en el apartado anterior. Para el ensayo 27, pendiente 1/15 y frecuencia 1,93, siendo éste el ratio de frecuencia de resonancia (frecuencia de encuentro igual a dos veces la frecuencia natural del buque) se puede observar la siguiente figura:

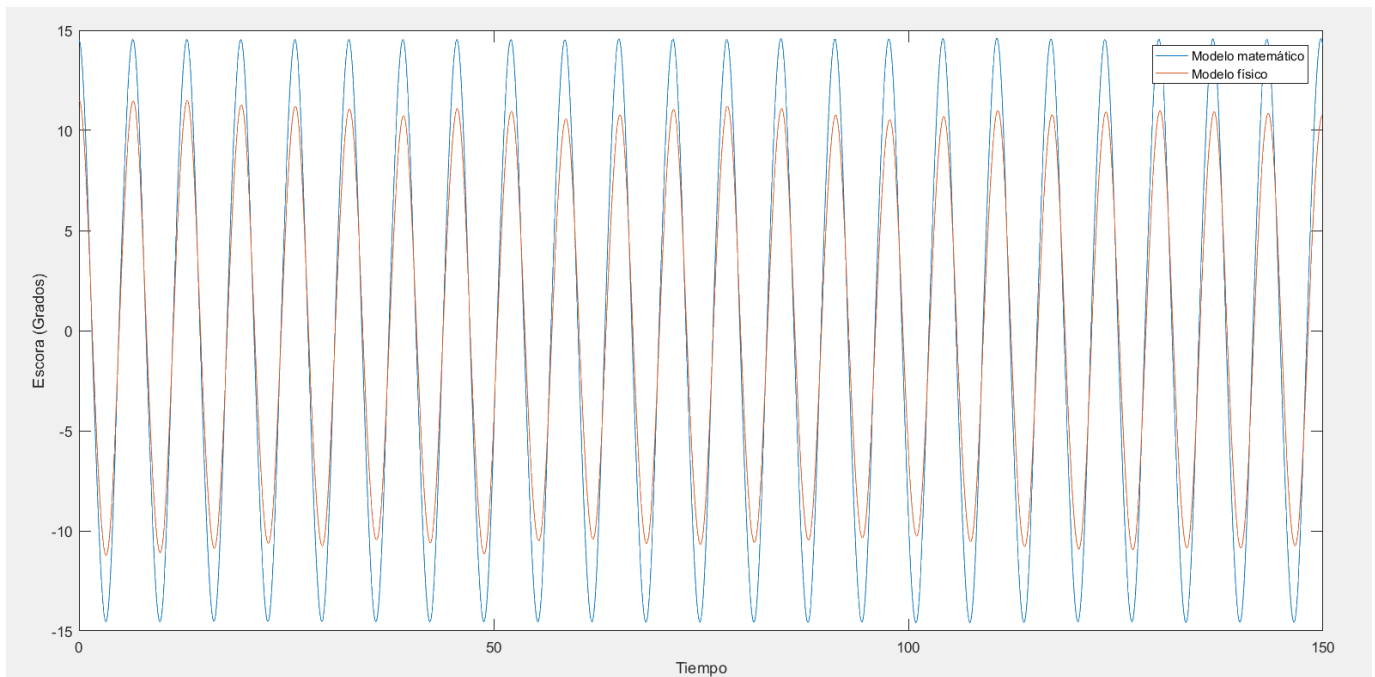


Figura 3.69 Comparaciones ensayo 27

En la gráfica anterior (Figura 3.69) se puede ver una mayor correlación del modelo físico con el modelo matemático. Al utilizar los valores de brazo adrizante, se consigue un modelo más exacto, con un porcentaje de error admisible.

Este error en el que el modelo matemático incurre puede darse debido al dinamismo despreciado en ambos modelos matemáticos. En estos modelos se tiene en cuenta los brazos adrizantes o altura metacéntrica a medida que pasa la ola, obteniendo un modelo cuasi estático. Sin embargo, en la realidad, el grado de libertad correspondiente al asiento también influye en la flotación y las características de estabilidad. En este modelo, ese efecto dinámico se pierde, por lo que funcionará peor cuanto más relevancia tenga el grado de libertad de asiento.

A continuación se pueden observar otras de las gráficas generadas, con diversos ensayos y sus correspondientes modelaciones:

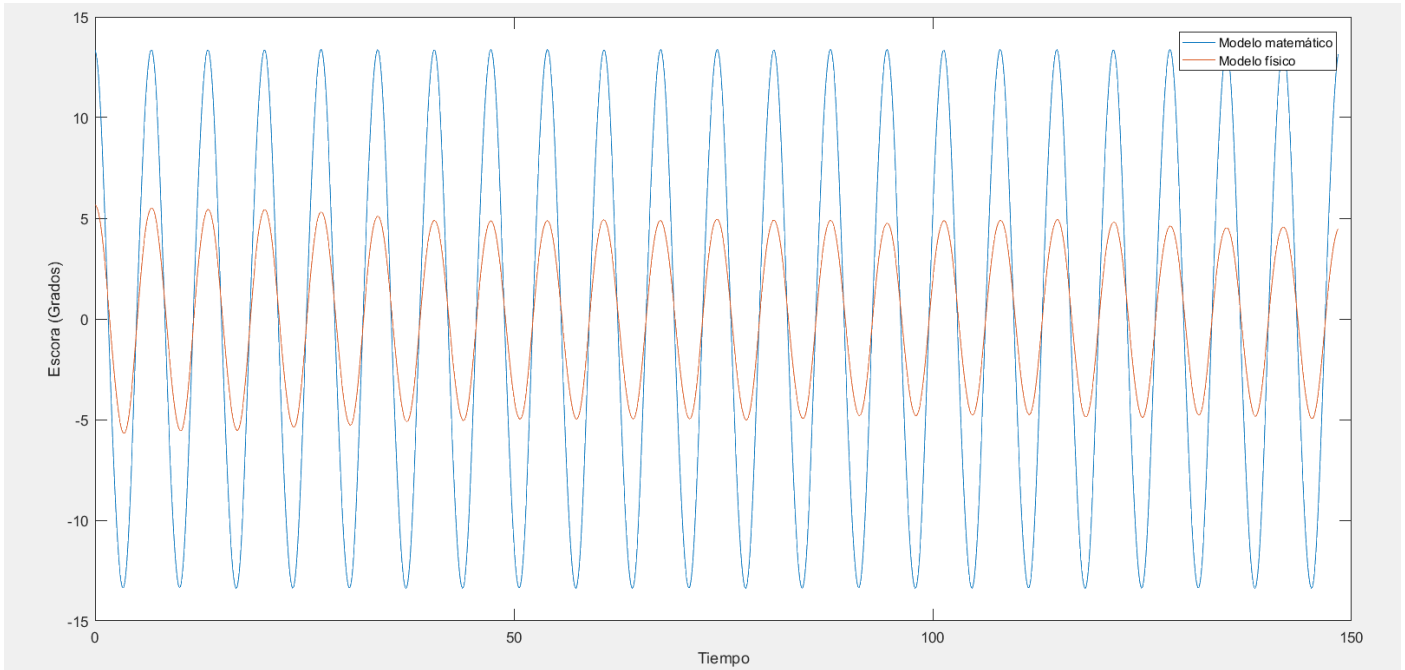


Figura 3.70 Comparaciones ensayo 12 (Pendiente 1/30, Ratio 1,98)

Esta gráfica corresponde a una pendiente más pequeña, y el error en el que incurre el modelo matemático es mayor.

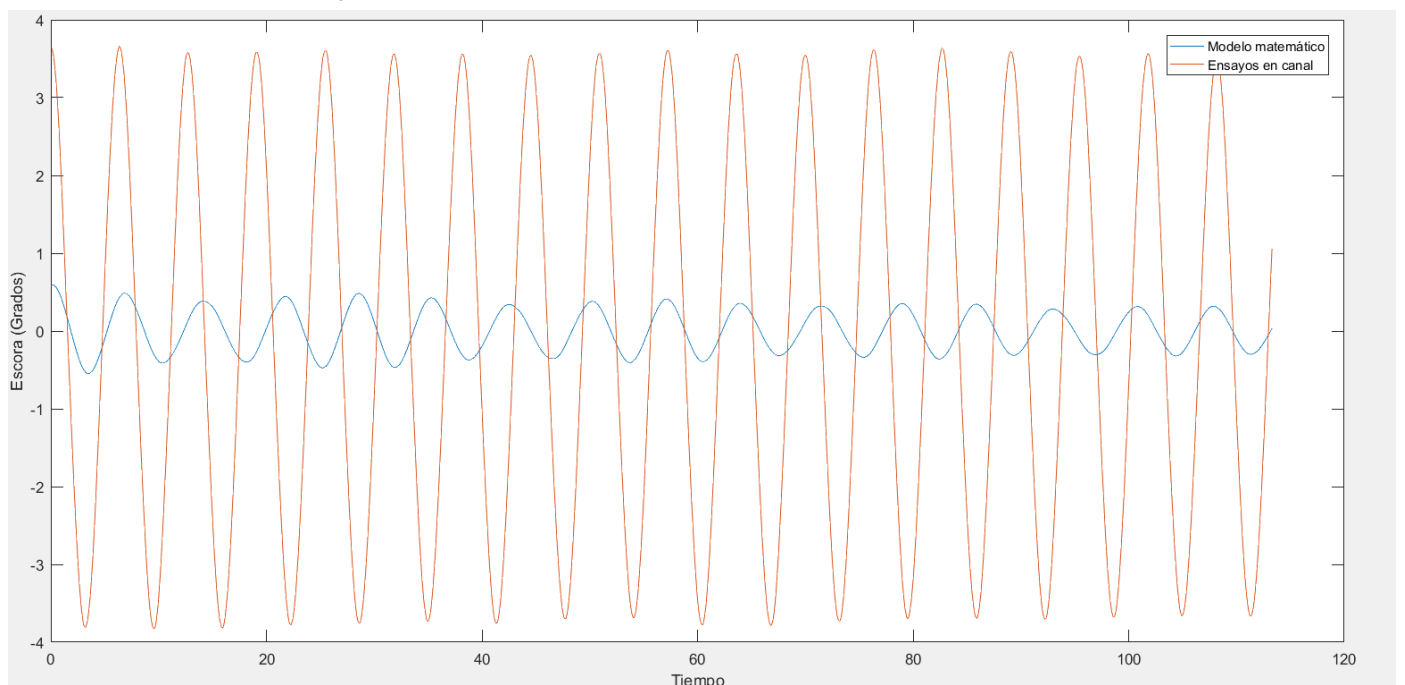


Figura 3.71 Comparaciones ensayo 21 (Pendiente 1/20, Ratio 2.1)

En este ensayo se puede observar que el modelo matemático no interpreta esta frecuencia como problemática para la resonancia paramétrica, pero sí se produce el fenómeno

en los ensayos en canal. El período de la onda tampoco se corresponde con el generado en el canal

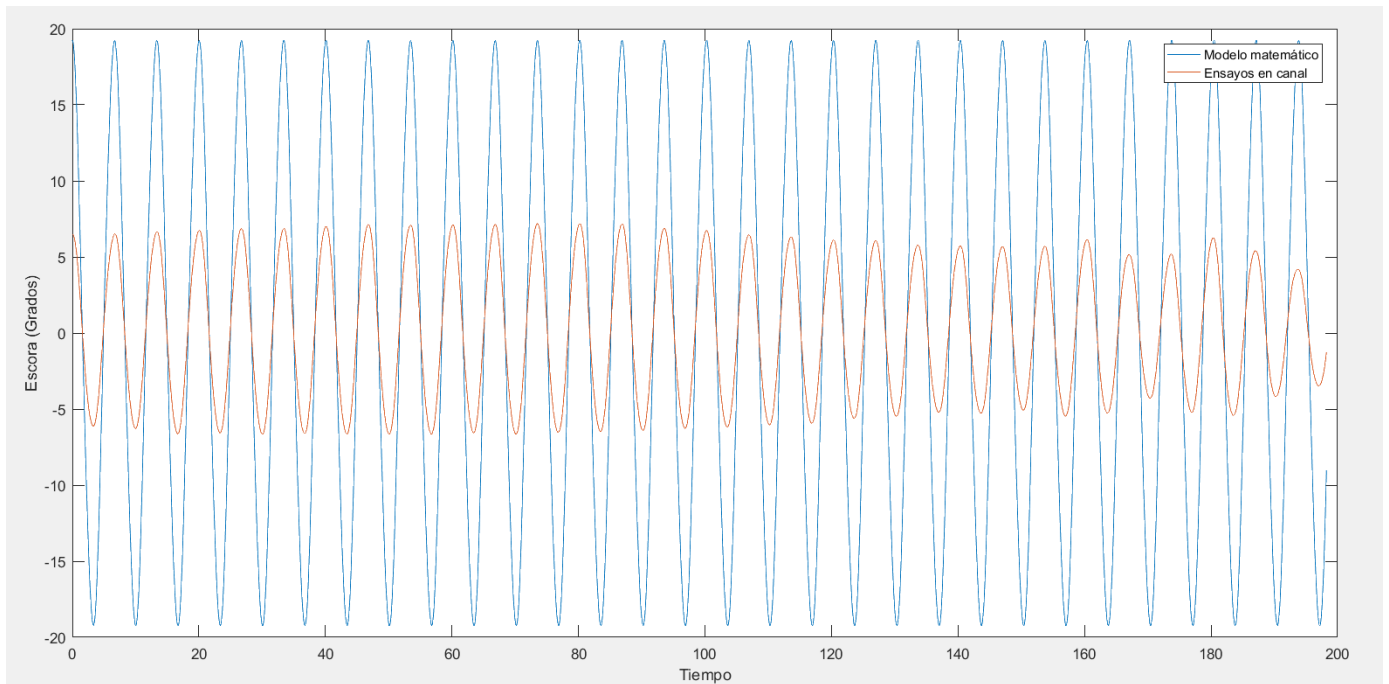


Figura 3.72 Comparaciones ensayo 33 (Pendiente 1/15, Ratio 2)

Si se representase un ensayo que no muestra resonancia, se obtiene la siguiente gráfica:

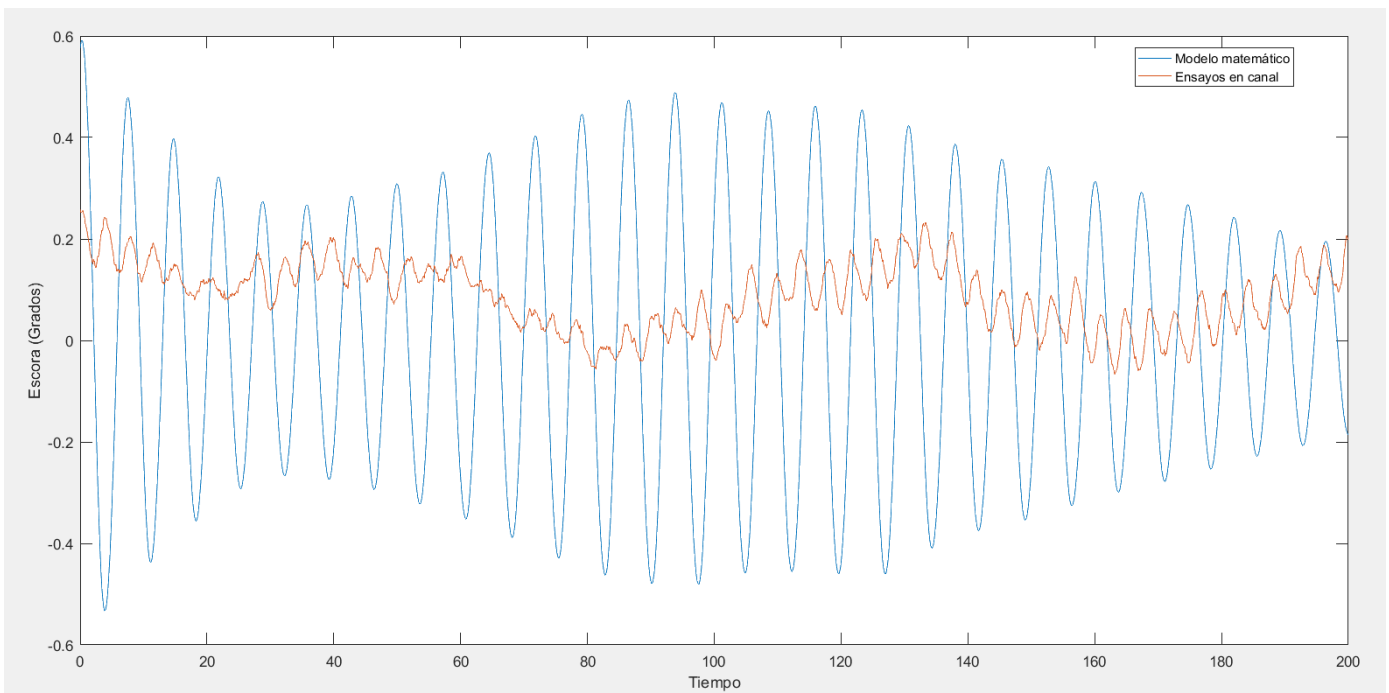


Figura 3.73 Comparaciones ensayo 1 (Pendiente 1/50, Ratio 1,7)

Al tratarse de un ensayo que no produce resonancia, casi no se capta movimiento en el grado de libertad correspondiente al balance. El modelo matemático obtiene unos datos más precisos, pero de una amplitud prácticamente nula.

Si se representan, como anteriormente, los datos de los máximos en el modelo matemático y los ensayos en canal de una pendiente concreta, se obtienen las siguientes gráfica

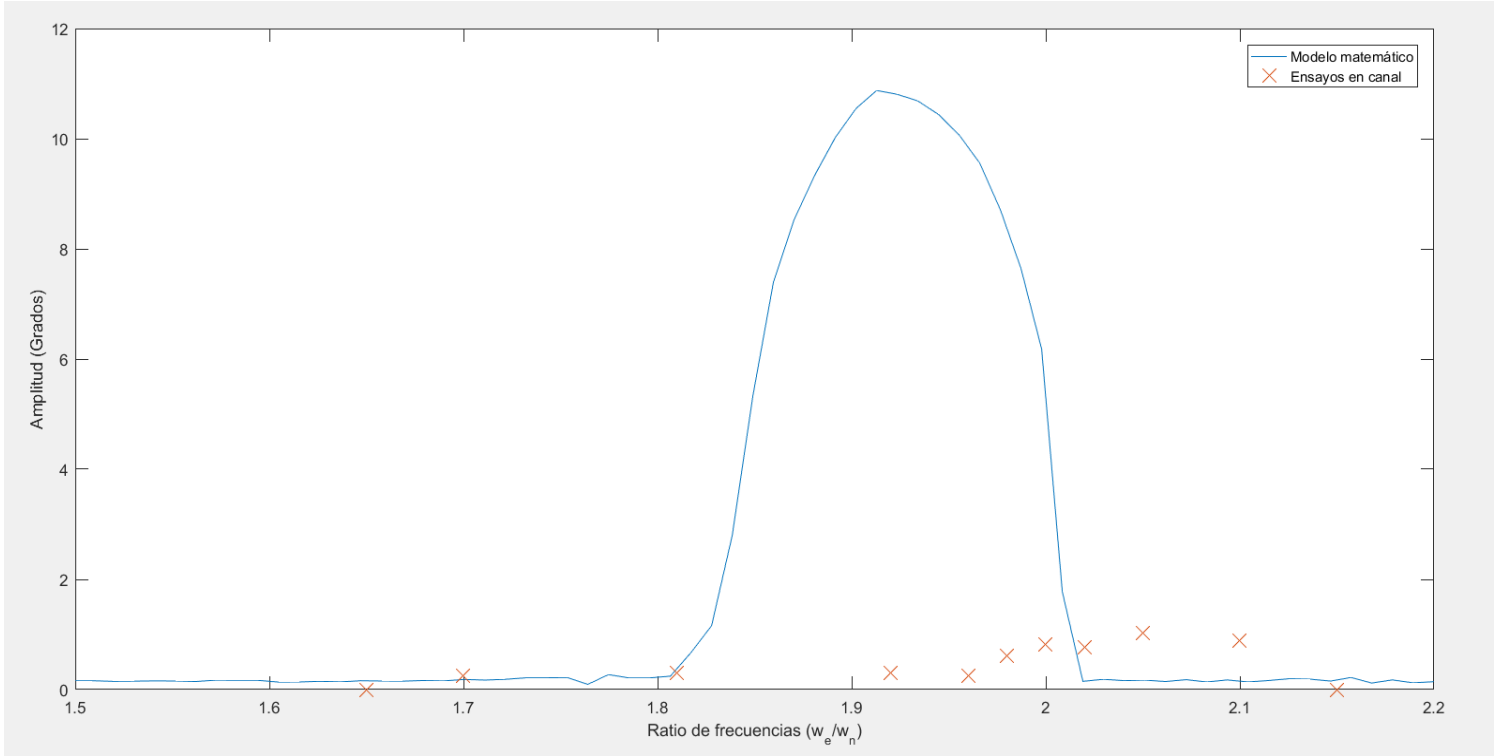


Figura 3.74 Máximos de pendiente 1/50

No se observa una gran relación entre los resultados obtenidos en esta pendiente. Como en el caso anterior, al tratarse de la pendiente más pequeña, los ensayos se han realizado con olas de alturas muy pequeñas, generando amplitudes casi nulas. Sin embargo, las pendientes más altas tienen una relación mucho mayor comparado con el modelo anterior:

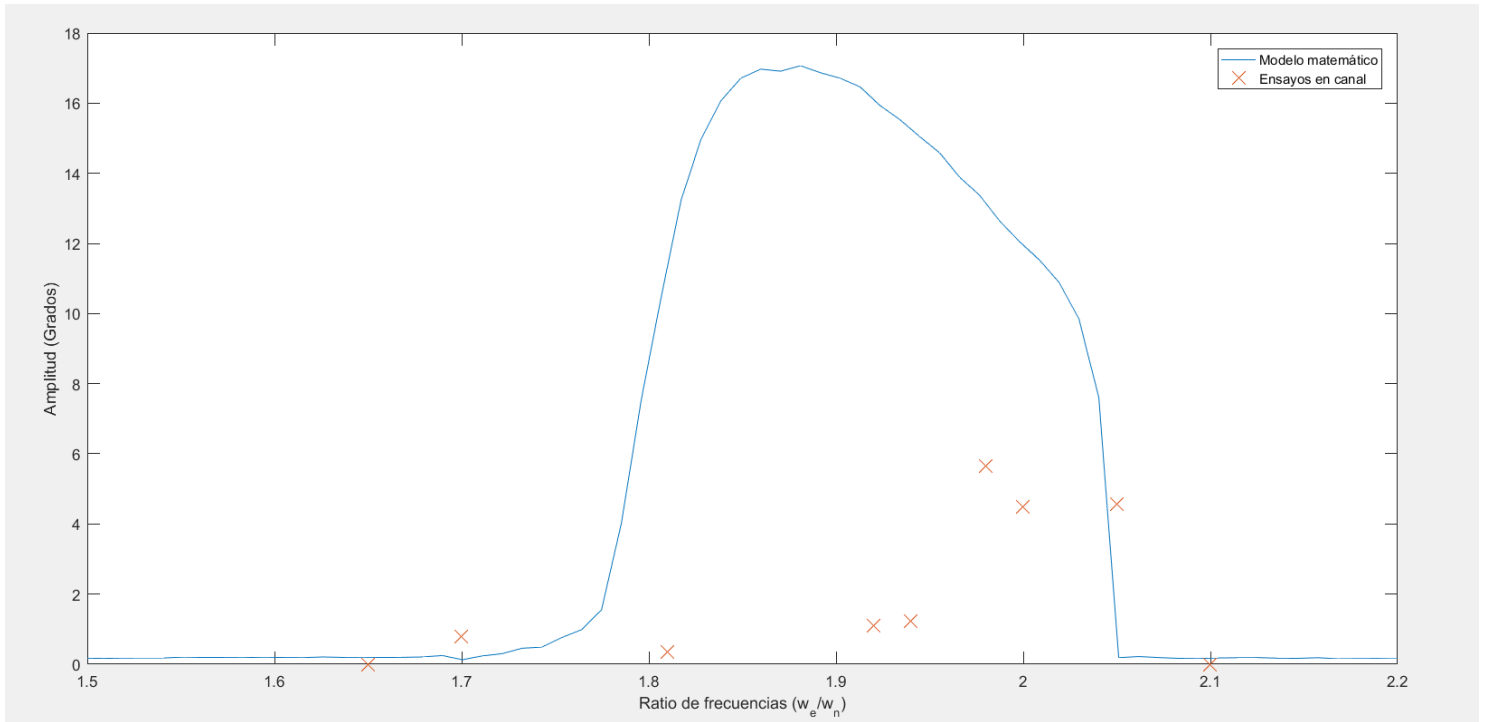


Figura 3.76 Máximos de pendiente 1/30

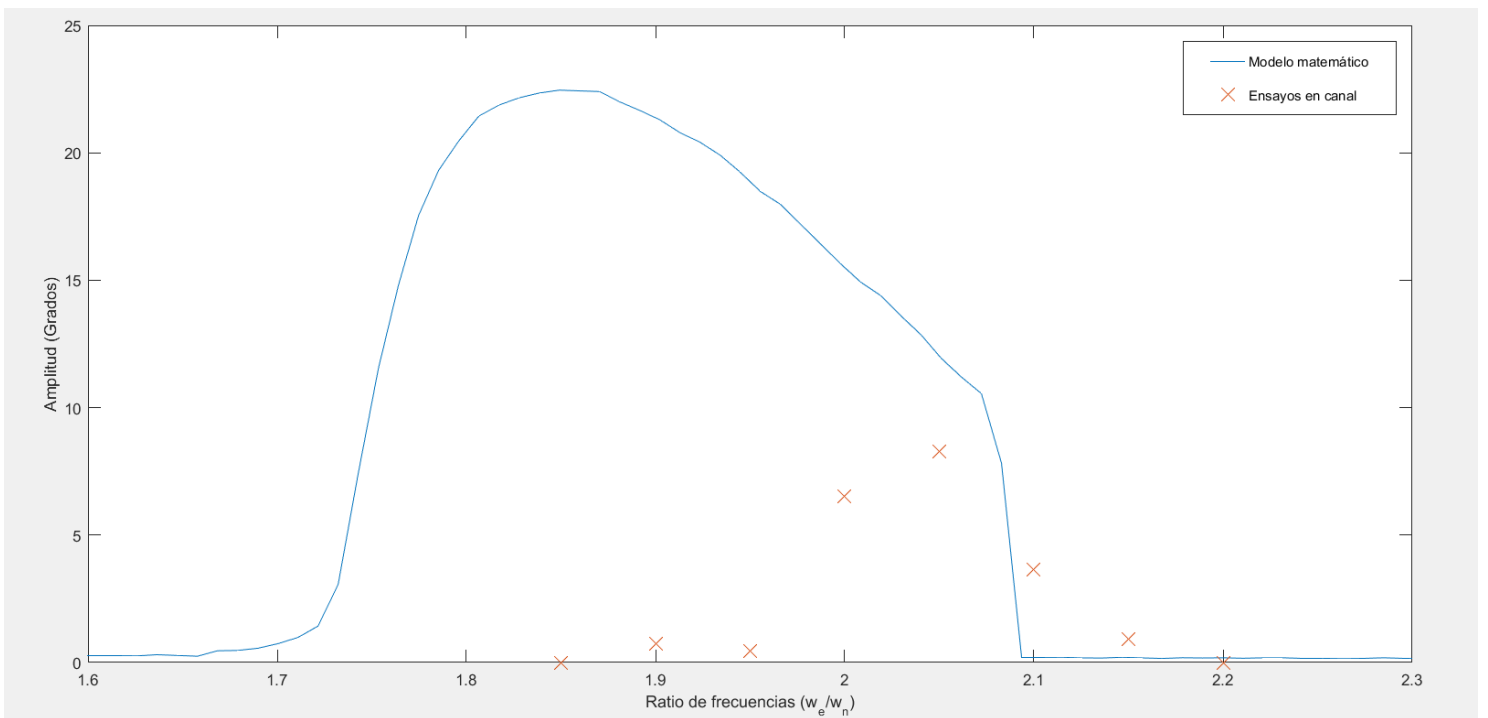


Figura 3.75 Máximos de pendiente 1/20

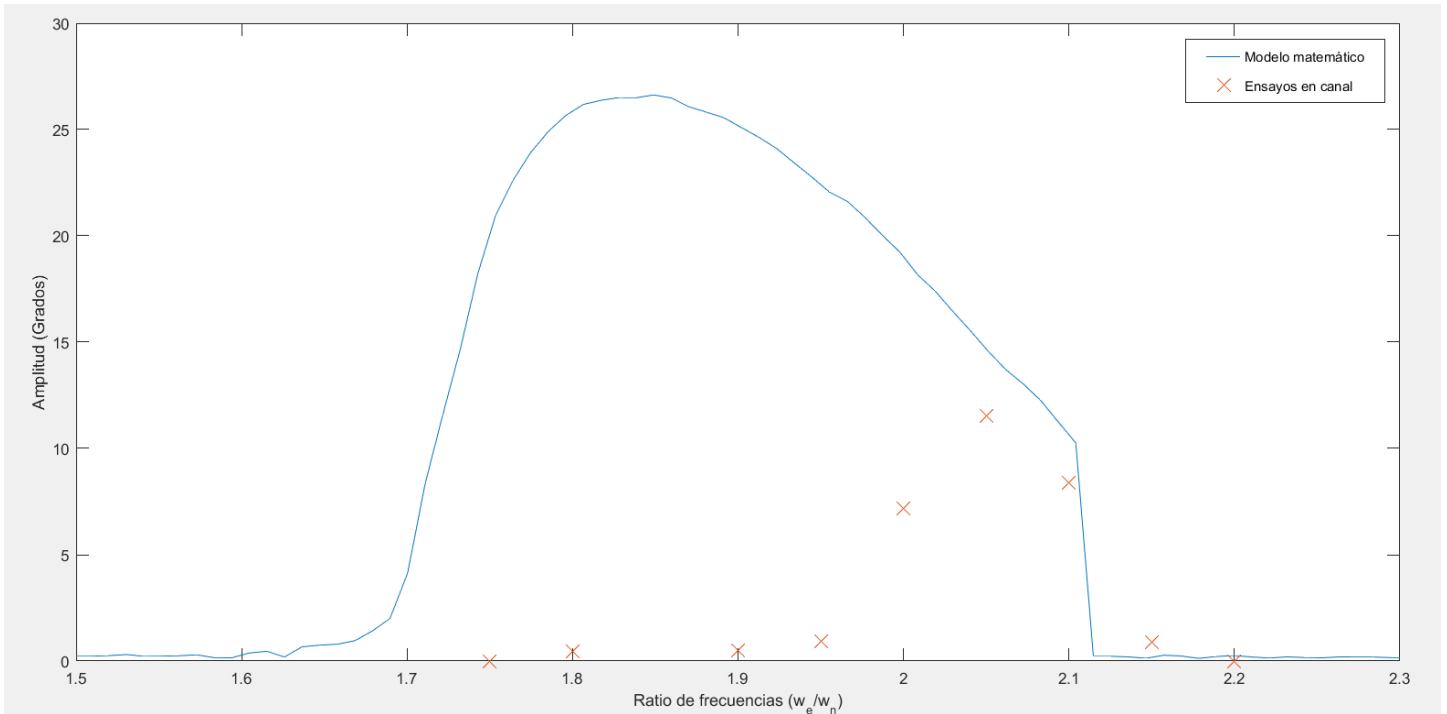


Figura 3.77 Máximos de pendiente 1/15

Como se puede observar, el modelo matemático no se corresponde con los ensayos en canal, pero sí tiene mucha más similitud que con el modelo matemático real. Una de las causas de esta diferencia, como se explicaba al inicio de este apartado, la influencia que el cabeceo tiene en la resonancia paramétrica y en la flotación del buque. El script utilizado, como en el anterior apartado, será adjuntado como anexo a este trabajo (Anexo 11).

Para ilustrar de forma más clara como se desarrollan los modelos con respecto a las pendientes, se ha optado por representar los máximos de cada una de las pendientes generadas para cada uno de los modelos. A continuación se puede ver esta representación:

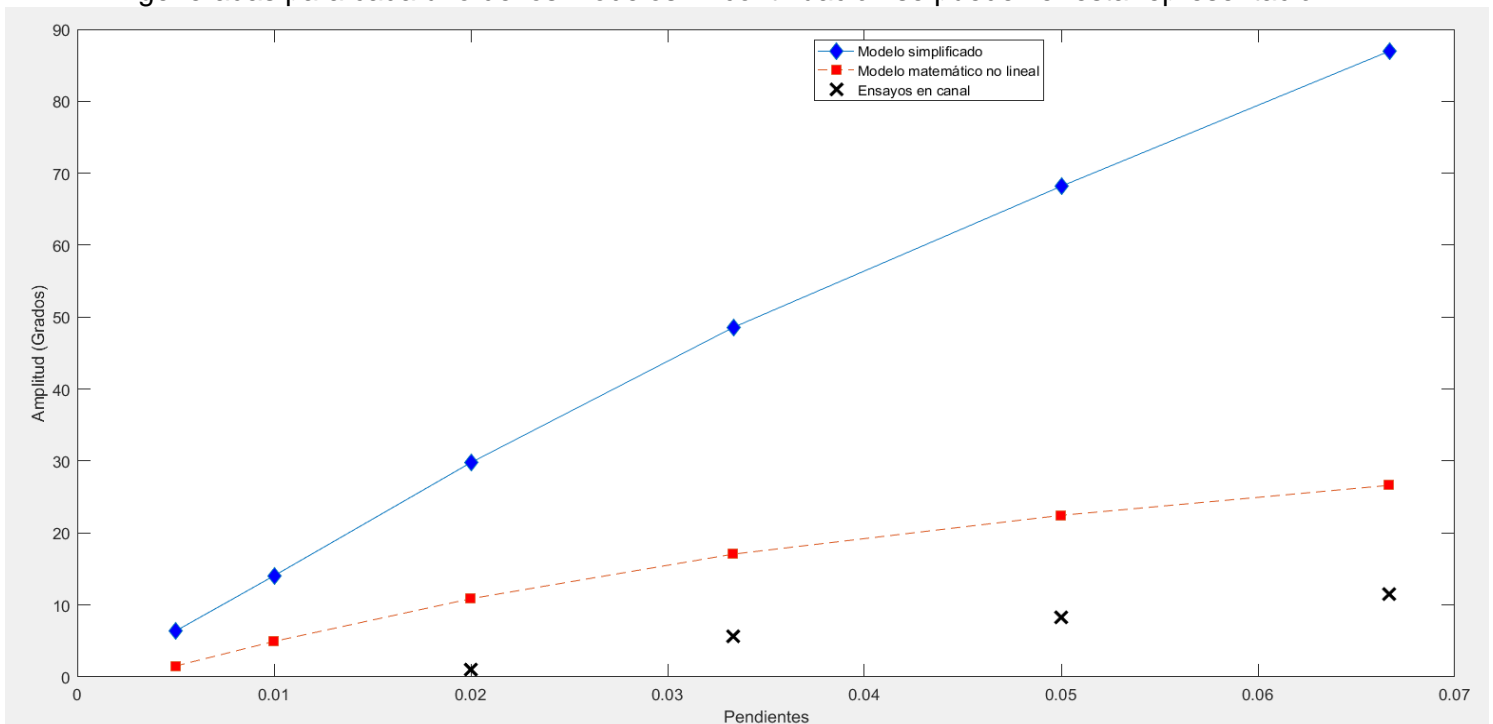


Figura 3.78 Máximos de cada pendiente

En la representación anterior (Figura 3.78) se pueden ver de forma resumida las diferencias que existen entre los modelos y los ensayos en canal. Los puntos se corresponden a los máximos de cada una de las pendientes.

Refiriéndose al modelo matemático simplificado, éste tiene una tendencia de aumento con respecto al aumento de la altura metacéntrica. Se puede observar que difiere en gran medida con el modelo físico, obteniendo valores máximos muy por encima del mismo, incluso valores que no tendrían sentido (para la pendiente más alta se encuentra un valor de casi 90 grados de escora). Este modelo desprecia la dependencia del valor de estabilidad con el ángulo de escora, por lo que no funciona de forma adecuada para ángulos grandes.

En cuanto al modelo matemático no lineal, su tendencia es mucho más parecida a lo que ocurre realmente con el modelo. Se puede observar prácticamente un paralelismo entre ambas líneas, siendo el modelo matemático más pesimista, con ángulos de escora más grandes. Esta diferencia vendría debida principalmente a la influencia del cabeceo.

3.3.3 Resultados ensayo – modelos anteriores

Como se ha comentado al inicio de los apartados relativos a los ensayos en canal, el texto [5] trata sobre un tema similar al estudiado en el presente trabajo. En él, se pueden observar análisis similares a este con un modelo matemático distinto del mismo modelo que ha sido utilizado para los ensayos. Las características del modelo y del modelo matemático son diferentes, pero se ha considerado interesante comparar ambos resultados.

Si se comparan los ensayos, para el primero mostrado en el texto, pendiente 1/50 y ratio 2, se obtiene la siguiente gráfica:

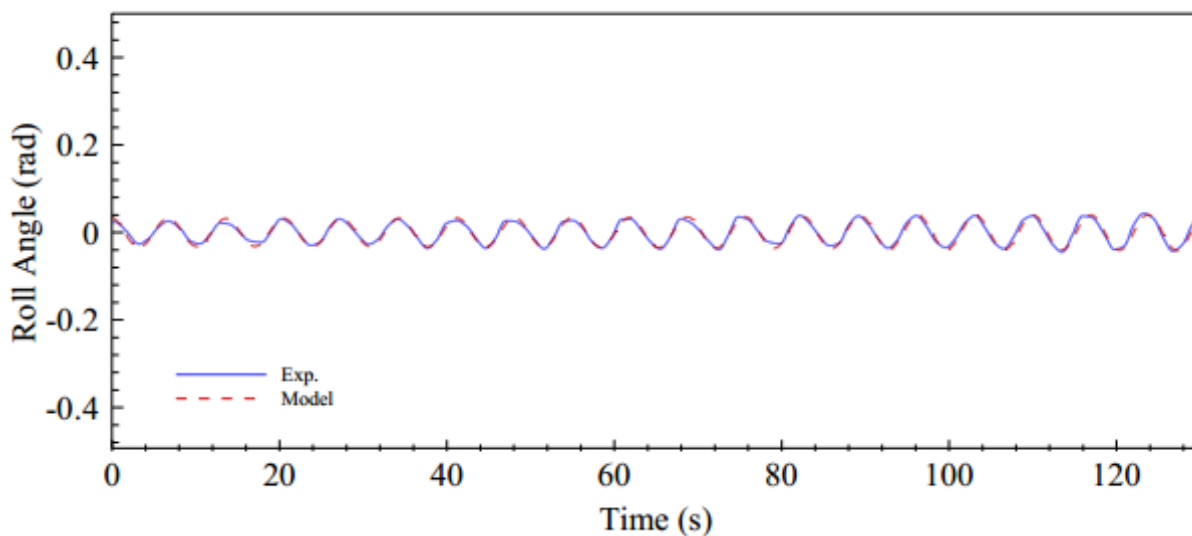


Figura 3.79 Ensayo modelo anterior, pendiente 1/50, ratio 2

En el caso del texto, las amplitudes obtenidas son constantes y similares al modelo matemático. Para los ensayos realizados en el presente trabajo, no se obtiene resultado de resonancia paramétrica, obteniendo una gráfica que muestra la falta de muestreo por parte de la IMU:

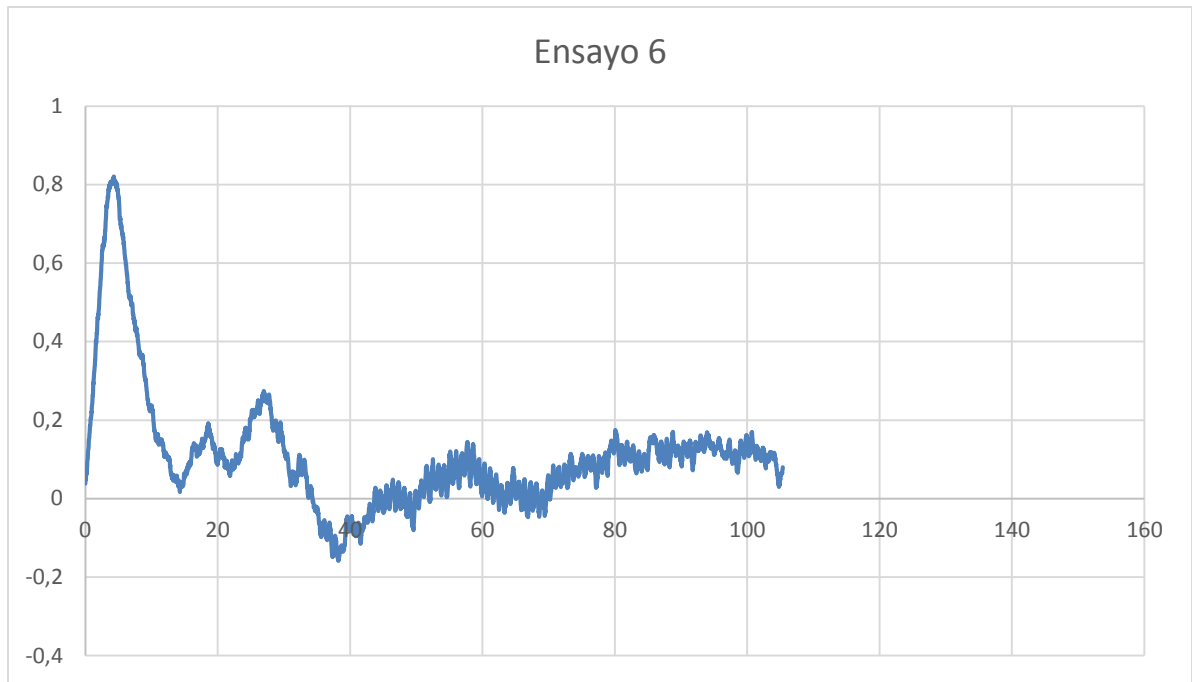


Figura 3.80 Ensayo 6, pendiente 1/50, ratio 2

En cuanto a ensayos más indicativos, para el ensayo de pendiente 1/15 y ratio 2,1, se puede observar la siguiente gráfica:

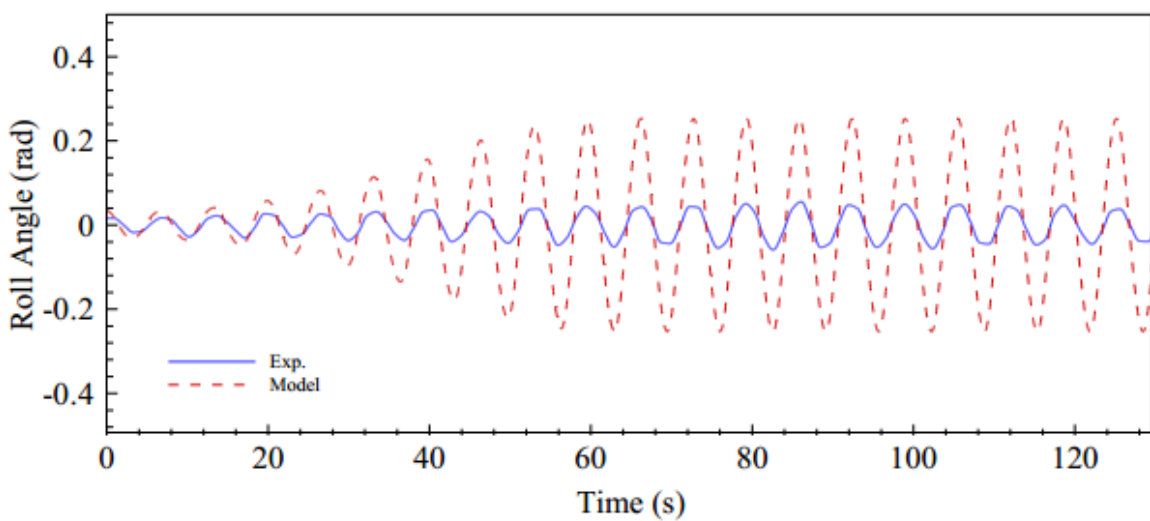


Figura 3.81 Ensayo modelo anterior, pendiente 1/15, ratio 2,1

Si se muestra el ensayo correspondiente, comparándolo con el modelo matemático no lineal, se obtiene lo siguiente:

Comparando ambas representaciones se puede ver que se obtienen conclusiones completamente opuestas. En el caso del texto [5] el modelo matemático está sobredimensionado con respecto a lo que ocurre en la realidad, obteniendo resultados de 10 grados (nótese que las representaciones del texto tienen su escala en radianes).

Sin embargo, en el análisis llevado a cabo ocurre lo contrario. En este caso, son los ensayos en canal los que producen una amplitud mayor, dejando el modelo matemático con amplitudes más pequeñas.

Al tratarse de modelos matemáticos diferentes, no es posible una comparación real. Sin embargo, los valores registrados en el ensayo realizado en el canal de experiencias de la Universidad de la Coruña son prácticamente similares a los generados por el modelo matemático del texto, siendo este un detalle curioso.

La observación anterior se debe a la consideración del modelo matemático del texto. En el texto, el modelo matemático es un modelo que contempla tres grados de libertad, entre los que se encuentra el cabeceo, la arfada y la escora. El buque, por sus características, el

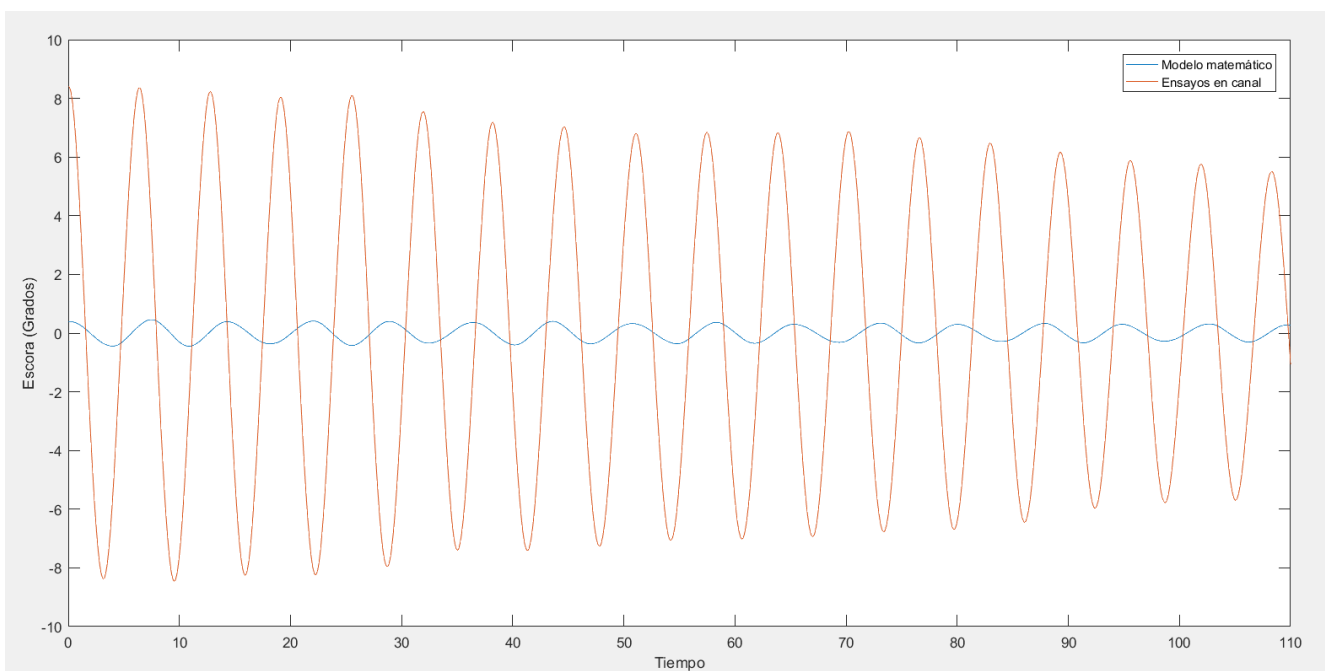


Figura 3.82 Ensayo 32, pendiente 1/15, ratio 2,1

grado de libertad correspondiente al cabeceo tiene una gran repercusión en la resonancia paramétrica. Esto hace con que el modelo del texto represente de forma más exacta cómo se comporta el buque de estudio.

Sin embargo, otros buques arrastreros, como puede ser el “Spanish Trawler” que se menciona en el texto [5], se comportan de una manera similar al modelo generado en el presente trabajo

4 CONCLUSIONES

La generación de modelos matemáticos y solución de ecuaciones de movimiento ha sido analizada de forma pormenorizada, centrándose en la solución del grado de libertad correspondiente al balance. Varios antecedentes han sido mostrados de la resonancia paramétrica, reflejando su problemática si no existe una manera de predecirlo y salir del intervalo de peligrosidad.

Como objetivos iniciales del presente trabajo se han considerado la generación de varios modelos matemáticos. El primero de ellos sería simplificado, considerando como valores recuperadores los obtenidos de las alturas metacéntricas. En caso del segundo, se obtendría este elemento recuperador por medio de los brazos adrizantes dependientes del propio ángulo de escora, generando un modelo no lineal. Los datos de brazos y alturas serían calculados de forma cuasiestática, es decir, se calcularían para cada instante de tiempo y se introducirían en el modelo.

Para obtener los datos correspondientes a la ecuación de movimiento y realizar los modelos matemáticos, se ha acudido a herramientas ofimáticas y valores calculados de forma experimental. De forma automatizada, se han calculado los miles de valores de alturas metacéntricas y brazos adrizantes necesarios para obtener el elemento recuperador de la ecuación

Una vez obtenidos los modelos matemáticos, se compararían con los ensayos en canal ya realizados. Estos ensayos se realizarán a velocidad 0 en un canal de experiencias, generando unas olas determinadas, con un modelo de un pesquero susceptible a fallos por resonancia paramétrica. Se han realizado un total de 33 ensayos para su posterior comparación.

Entre las pruebas físicas realizadas para obtener los valores que caracterizan la condición de carga y las características del buque, se han realizado pruebas de estabilidad y ensayos de decaimiento. Es necesario tener en cuenta las escalas en el modelo y los tiempos en los que se toman los datos, para poder extrapolar los valores obtenidos a valores comparables y de utilización, tanto en el modelo matemático como en la caracterización del buque.

Con todos los datos, se han realizado varias comparaciones con los modelos matemáticos y con los ensayos en canal. Existen varias relaciones entre los mismos, con una similitud mayor o menor dependiendo del caso. También se han acudido a textos anteriores con bases de datos similares para poder ser comparadas. Han sido extraídas varias conclusiones interesantes sobre el comportamiento del modelo matemático y sobre el comportamiento del buque analizado.

Se concluye, por tanto, que el modelo matemático realizado no capta con precisión las amplitudes de balance, con un comportamiento no muy similar. El modelo no lineal determina los valores de frecuencia en los que se produce la resonancia, aunque se encuentra un poco desplazado con respecto a la realidad, abarcando una cantidad de frecuencias mayores de las que se observan en los ensayos.

Una vez caracterizado la problemática de la resonancia paramétrica se podría avanzar hacia la seguridad y prevención del problema, utilizando métodos físicos, como podrían ser quillas de balance o tanques de lastre libre. Se podría utilizar la misma metodología, generando un modelo matemático que responda a los movimientos del buque con estos elementos, y realizando ensayos en canal con los elementos introducidos en el modelo físico.

Otro posterior trabajo a realizar podría ser la obtención de un modelo matemático que reflejase de forma más exacta el comportamiento del buque en situaciones de resonancia paramétrica. Se ha comentado anteriormente la problemática del buque a enfrentar el cabeceo, siendo este movimiento un gran aporte a la generación del fenómeno. La generación de un modelo de tres grados de libertad que contemple los posibles cambios en el cabeceo podría predecir mejor el movimiento del buque cuando se produce la resonancia paramétrica, pudiendo ser comparado con los resultados de la presente memoria.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] X. Zhang, H. zhen Yang, F. Xiao, and P. ji Xu, “Ince-Strutt stability charts for ship parametric roll resonance in irregular waves,” *China Ocean Eng.*, vol. 31, no. 4, pp. 447–457, 2017.
- [2] X. Hou and Z.-J. Zou, “OMAE2016-54316.” School of Naval Architecture, Ocean and C i vil Engineering Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China, pp. 1–6, 2017.
- [3] R. Galeazzi, M. Blanke, and N. K. Poulsen, “Parametric Resonance in Dynamical Systems.” p. 28, 2012.
- [4] R. Galeazzi, M. Blanke, and S. Member, “Early Detection of Parametric Roll Resonance on,” pp. 1–15.
- [5] M. Miguez Gonzalez, “A STUDY OF SHIP PARAMETRIC ROLL RESONANCE FOR THE EVALUATION OF PREVENTIVE STRATEGIES,” 2012.
- [6] M. Miguez Gonzalez, V. Diaz Casas, F. López Peña, and L. Perez Rojas, “Experimental Parametric Roll Resonance Characterization of a Stern Trawler in Head Seas,” *11th Int. Conf. Stab. Ships Ocean Veh.*, no. September, pp. 625–634, 2012.
- [7] S. Ribeiro E Silva and C. Guedes Soares, “Parametric Rolling of a Container Vessel in Longitudinal Waves,” *10th Int. Conf. Stab. Ships Ocean Veh.*, pp. 597–608, 2009.
- [8] T. U. Roberto Galeazzi, Associate Professor, “Container Ship,” *Container Ship Update*, vol. 1, pp. 1–6, 2014.
- [9] Y. H. ZHOU, N. MA, J. LU, and M. GU, “A study of hybrid prediction method for ship parametric rolling,” *J. Hydrodyn.*, vol. 28, no. 4, pp. 617–628, 2016.
- [10] W. Froude, “On the Rolling of Missile,” *Bureau of Ordnance, BTN 33, Washington, D.C.* Institution of Naval Architects, p. 52, 1861.
- [11] M. A. Santos Neves, N. Pérez, and O. Lorca, “Analysis of roll motion and stability of a fishing vessel in head seas,” *Ocean Eng.*, vol. 30, no. 7, pp. 921–935, 2003.
- [12] G. Bulian, “Nonlinear Parametric Rolling in Regular Waves : An Approximate Parametric Resonance,” vol. 50, no. 3, pp. 239–249, 2006.
- [13] D. Terada, A. Matsuda, and E. Agency, “Estimation of the Random Exciting Force Causing Parametric Roll Resonance,” no. 2, pp. 575–581, 2016.

- [14] R. Galeazzi, M. Blanke, and N. K. Poulsen, “Early detection of parametric roll resonance on container ships,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 21, no. 2, pp. 489–503, 2013.
- [15] Y. S. Shin *et al.*, “Criteria for Parametric Roll of Large Containerships in Longitudinal Seas,” *Trans. Soc. Nav. Archit. Mar. Eng.*, vol. 112, pp. 14–47, 2004.
- [16] E. Methods, “ITTC – Recommended Procedures and Guidelines ITTC – Recommended Procedures and Guidelines Predicting the Occurrence and Magnitude of Parametric Rolling .,” *Engineering*, 2006.
- [17] T. Insperger and G. Stépán, “Stability of the Damped Mathieu Equation With Time Delay,” *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 125, no. 2, p. 166, 2003.
- [18] B. van Laarhoven, “Stability Analysis of Parametric Roll Resonance,” *Eindhoven Univ. Technol. Dep. ...*, no. June, 2009.
- [19] S. Liu and A. Papanikolaou, “Prediction of parametric rolling of ships in single frequency regular and triple frequency group waves,” *Ocean Eng.*, vol. 120, pp. 274–280, 2016.
- [20] W. N. France, M. Levadou, T. W. Treakle, J. R. Paulling, R. K. Michel, and C. Moore, “An investigation of Head-Sea Parametric Rolling and its Influence on Container Lashing Systems,” *SNAME Annual Meeting 2001 Presentation*. SNAME Annual Meeting 2001, pp. 1–24, 2001.
- [21] DMAIB, “SVENDBORG MÆRSK Heavy weather damage on 14 February 2014,” *Danish Marit. Accid. Investig. Board*, vol. 2013010519, no. September, 2014.
- [22] I. Ghamari, O. M. Faltinsen, M. Greco, and C. Lugni, “OMAE2017-62053,” pp. 1–10, 2017.
- [23] A R J M LLOYD BSc PhD FEng FRINA, “SEAKEEPING: Ship Behaviour in rough weahter.” Lloyd, p. 396, 1998.
- [24] O. Office, U. Manual, and A. B. V Page, “OCTOPUS Office 6 User Manual,” no. September, pp. 1–69, 2010.
- [25] M. Míguez González and G. Bulian, “Influence of ship dynamics modelling on the prediction of fishing vessels roll response in beam and longitudinal waves,” *Ocean Eng.*, vol. 148, no. November 2017, pp. 312–330, 2018.
- [26] G. Bulian, “FINDEXTR Function.” .
- [27] R. Bhattacharyya, *Dynamics of Marine Vehicles*. New York: JOHN

WILEY & SONS New York, 1972.

- [28] Y. Himeno, "Ship Roll Damping- Jure and Marine Engineering the University of Michigan," no. 239, 1981.
- [29] P. Ojea Gonzalez, "Análise numérica e experimental do balance de ondas de través dun buque de pesca." A Coruña, p. 117, 2018.

Índice de figuras

Figura 2.1 Modelo de pesquero sometido a ola sinusoidal.....	14
Figura 2.2: Área de flotación con el paso de la ola.....	15
Figura 2.3 Resultado de análisis de estabilidad a grandes ángulos	15
Figura 2.4 Grados de libertad de un buque	16
Figura 2.5 Gráfica de estabilidad de Strutt-Ince sobre la ecuación amortiguada de Mathieu.....	22
Figura 2.6 Daños del APL China “www.cojeen.com “[En línea, 13 de Novimebre de 2017].....	25
Figura 2.7 Maersk Carolina en terminal de desembarco “https://www.fleetmon.com “[En línea, 15 de Novimebre de 2017]	26
Figura 2.8 Buque Svendborg Maerks “http://www.shipspotting.com” [En línea, 22 de noviembre de 2017]	27
Figura 2.9 Daños en el Svendborg Maersk producidos por resonancia paramétrica [21].....	28
Figura 2.10 Estado de los elementos de trincado en el Svendborg Maersk [21].....	29
Figura 2.11 Svendborg Maersk en Málaga, después del accidente “https://eideard.com” [En línea, 22 de Noviembre de 2017]	30
Figura 2.12 Voyager intentando combatir una tormenta (resonancia paramétrica) https://www.youtube.com/watch?v=tVoMtPFtEg0 [En línea, 22 de Noviembre de 2017]31	
Figura 3.1 Formas del MFV Trident.....	33
Figura 3.2 Vistas del MFV Trident.....	34
Figura 3.3 Fotografía del MFV Trident	34
Figura 3.4 Series temporales para pendiente 1/200.....	39
Figura 3.5 Ejemplo de serie temporal sin resonancia.....	39
Figura 3.6 Ejemplo de serie temporal con resonancia.....	40
Figura 3.7 Frecuencias filtradas en radianes.....	41
Figura 3.8 Resultados para pendiente 1/200.....	41
Figura 3.9 Formas del buque	43
Figura 3.10 Ejemplo de reporte de Maxsurf Stability Design	44
Figura 3.11 Ola generada con “phase offset” en 0	44
Figura 3.12 Ola generada con “phase offset” en 0	45
Figura 3.13 Valores definidos en Visual Basic.....	46
Figura 3.14 Valores de tabla en Visual Basic	47
Figura 3.15 Fragmento de resultados que reporta Visual Basic	48
Figura 3.16 Representación de la teoría de las rebanadas [23]	49
Figura 3.17 Representación de cambio de cilindro a formas de Lewis [23]	50

Figura 3.18 Formas extraídas de Amarcon Octopus Office	51
Figura 3.19 Malla generada en Amarcon Octopus Office	52
Figura 3.20 Valore de A_{44} extraídos de Amarcon Octopus Office	52
Figura 3.21 Representación de ensayo de decaimiento	55
Figura 3.22 Ensayo de decaimiento 7	56
Figura 3.23 Ensayo de decaimiento 4	56
Figura 3.24 Escora modelada en pendiente 1/200 para una frecuencia de 1,89 rad/s ...	57
Figura 3.25 : Escora modelada en pendiente 1/200 para una frecuencia de 1,90 rad/s .	57
Figura 3.26 Escora modelada en pendiente 1/200 para una frecuencia de 1,91 rad/s ...	58
Figura 3.27 Escora modelada en pendiente 1/50 para una frecuencia de 1,89 rad/s	58
Figura 3.28 Escora modelada en pendiente 1/50 para una frecuencia de 1,90 rad/s	59
Figura 3.29 Escora modelada en pendiente 1/50 para una frecuencia de 1,91 rad/s	59
Figura 3.30 Frecuencias que generan resonancia a diversas pendientes en modelo de alturas metacéntricas	60
Figura 3.31 Resultados de Maxsurf Stability Design	62
Figura 3.32 Escora modelada en pendiente 1/200 para una frecuencia de 1,81 rad/s ...	63
Figura 3.33 Escora modelada en pendiente 1/200 para una frecuencia de 1,91 rad/s ...	64
Figura 3.34 Escora modelada en pendiente 1/50 para una frecuencia de 1,81 rad/s	64
Figura 3.35 Escora modelada en pendiente 1/50 para una frecuencia de 1,88 rad/s	65
Figura 3.36 Frecuencias que generan resonancia a diversas pendientes en modelo de brazos adrizantes	65
Figura 3.37 Modelo del buque MFV Trident	67
Figura 3.38 Modelo en la zona de pruebas de estabilidad	68
Figura 3.39 Realización de la prueba de estabilidad	69
Figura 3.40 IMU XSens utilizada para la medición en los ensayos	72
Figura 3.41 Resultado reportado por la IMU del ensayo de decaimiento	72
Figura 3.42 Función Ensayo 1 de prueba de decaimiento	73
Figura 3.43 Función Ensayo 2 de prueba de decaimiento	74
Figura 3.44 Función Ensayo 4 de prueba de decaimiento	74
Figura 3.45 Obtención de los valores de amortiguamiento	75
Figura 3.46 Curva de funcionamiento de la pala	77
Figura 3.47 Canal de experiencias del Centro de Investigación Tecnológica, Ferrol	78
Figura 3.48 Pala generadora de olas y carro dispuesto en el centro del canal	79
Figura 3.49 : Modelo dispuesto en el canal	80
Figura 3.50 Ensayo en el canal sin resonancia	81
Figura 3.51 Ensayo en el canal con resonancia	82
Figura 3.52 Ensayo 26, pendiente 1/15 y ratio 2	84
Figura 3.53 Ensayo 33, pendiente 1/15 y ratio 2,05	84

Figura 3.54 Ensayo 28, pendiente 1/15 y ratio 2,1	85
Figura 3.55 Ensayo 32, pendiente 1/15 y ratio 2,1	86
Figura 3.56 Ensayo 27, pendiente 1/15 y ratio 2,05	87
Figura 3.57 Ensayo 1, pendiente 1/50 y ratio 1,7	87
Figura 3.58 Imágenes de ensayo en canal.....	88
Figura 3.59 Ensayo 27 normalizado.....	89
Figura 3.60 Comparaciones ensayo 27.....	90
Figura 3.61 Comparaciones ensayo 21 (Pendiente 1/20, Ratio 2,1).....	91
Figura 3.62 Comparaciones ensayo 12 (Pendiente 1/30, Ratio 1,98).....	91
Figura 3.63 Comparaciones ensayo 33 (Pendiente 1/15, Ratio 2).....	92
Figura 3.64 Comparaciones ensayo 1 (Pendiente 1/50, Ratio 1,7).....	92
Figura 3.65 Máximos de pendiente 1/50	93
Figura 3.66 Máximos de pendiente 1/30	94
Figura 3.67 Máximos de pendiente 1/20	94
Figura 3.68 Máximos de pendiente 1/15	95
Figura 3.69 Comparaciones ensayo 27.....	96
Figura 3.70 Comparaciones ensayo 12 (Pendiente 1/30, Ratio 1,98).....	97
Figura 3.71 Comparaciones ensayo 21 (Pendiente 1/20, Ratio 2.1).....	97
Figura 3.72 Comparaciones ensayo 33 (Pendiente 1/15, Ratio 2).....	98
Figura 3.73 Comparaciones ensayo 1 (Pendiente 1/50, Ratio 1,7).....	98
Figura 3.74 Máximos de pendiente 1/50	99
Figura 3.75 Máximos de pendiente 1/20	100
Figura 3.76 Máximos de pendiente 1/30	100
Figura 3.77 Máximos de pendiente 1/15	101
Figura 3.78 Máximos de cada pendiente.....	101
Figura 3.79 Ensayo modelo anterior, pendiente 1/50, ratio 2	102
Figura 3.80 Ensayo 6, pendiente 1/50, ratio 2.....	103
Figura 3.81 Ensayo modelo anterior, pendiente 1/15, ratio 2,1	103
Figura 3.82 Ensayo 32, pendiente 1/15, ratio 2,1	104

Índice de anexos

Anexo 1 – Script Visual Basic obtención de GM 1.....	114
Anexo 2 – Matrices resumen GM 2.....	117
Anexo 3 – Cartilla de trazado utilizada en Amarcon Octopus Office 3.....	121
Anexo 4 – Valores de masa añadida (A44, A42, A22) 4.....	128
Anexo 5 – Script modelo matemático ensayo de decaimiento 5.....	131
Anexo 6 – Ejemplo de matrices GZ 6.....	134
Anexo 7 – Script de modelo simplificado 7.....	137
Anexo 8 – Script Visual Basic para obtención de brazos adrizantes 8.....	142
Anexo 9 – Script modelo no lineal 9.....	145
Anexo 10 – Generación de matrices GZ para introducir en el script no lineal 10.....	151
Anexo 11 – Comparación de resultados 11.....	156

ANEXOS

Anexo 1 – Script Visual Basic obtención de GM 1

```
Sub RunLimitKGforTrimRange()
```

```
    hydromaxApp.Design.ActiveAnalysisMode = hmAMEquilibrium
```

```
    hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveForm = hmWFSinusoidal
```

```
    Dim FrecuencyStart As Double
```

```
    Dim FrecuencyFinish As Double
```

```
    Dim FrecuencyInterval As Double
```

```
    Dim Slope1 As Double
```

```
    Dim Slope2 As Double
```

```
    Dim Slope3 As Double
```

```
    Dim Slope4 As Double
```

```
    Dim Slope5 As Double
```

```
    Dim Slope6 As Double
```

```
    Dim FrecuencyIterator As Long
```

```
    Dim Slopeliterator As Long
```

```
    Dim iterator1 As Long
```

```
    Dim iterator2 As Long
```

```
    Dim WaveLenght As Double
```

```
    Dim Analysistext1 As String
```

```
    Dim Analysistext2 As String
```

```
    Dim GMResult As Double
```

```
    Dim rowOffset As Long
```

```
    Dim columnOffset As Long
```

```
    FrecuencyStart = Range("info!b18")
```

```
    FrecuencyFinish = Range("info!b19")
```

```
    FrecuencyInterval = Range("info!b20")
```

```
    Slope1 = Range("info!e18")
```

```
    Slope2 = Range("info!e19")
```

```
    Slope3 = Range("info!e20")
```

```
    Slope4 = Range("info!e21")
```

Slope5 = Range("info!e22")

Slope6 = Range("info!e23")

Frecuencylterator = Range("info!g18")

Slopelterator = Range("info!g19")

'A partir de aqui sería la programacion en si

For iterator1 = 1 To Slopelterator

For iterator2 = 1 To Frecuencylterator

WaveLength = (2 * 3.141592 * 9.81 / (FrecuencyStart) ^ 2)

WaveLength = Round(WaveLength, 3)

Range("results!c1") = WaveLength

hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveLength = WaveLength

If iterator1 = 1 Then hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveHeight = Slope1 * WaveLength

If iterator1 = 2 Then hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveHeight = Slope2*
hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveLength

If iterator1 = 3 Then hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveHeight = Slope3*
hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveLength

If iterator1 = 4 Then hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveHeight = Slope4*
hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveLength

If iterator1 = 5 Then hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveHeight = Slope5*
hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveLength

If iterator1 = 6 Then hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveHeight = Slope6*
hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveLength

Range("results!d1") = hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveHeight

hydromaxApp.Design.RunAnalysis

Analysistext1 = iterator1

Analysistext2 = FrecuencyStart

```
Range("a3").Offset(rowOffset, columnOffset).Value = "Resultados para: Pendiente  
de ola = " + Analysistext1 + " y frecuencia =" + Analysistext2 + ""
```

```
rowOffset = rowOffset + 1
```

```
Range("a3").Offset(rowOffset, columnOffset).Value = "GMT"
```

```
rowOffset = rowOffset + 1
```

```
For Each result In hydromaxApp.Design.EquilibriumResults
```

```
Range("a3").Offset(rowOffset, columnOffset).Value = result.GMT
```

```
rowOffset = rowOffset + 1
```

```
Next
```

```
columnOffset = columnOffset + 1
```

```
FrecuencyStart = FrecuencyStart + FrecuencyInterval
```

```
rowOffset = rowOffset - 22
```

```
Next
```

```
rowOffset = rowOffset + 25
```

```
columnOffset = 0
```

```
FrecuencyStart = Range("info!b18")
```

```
Next
```

```
End Sub
```

Anexo 2 – Matrices resumen GM 2

MATRIZ DELTA GM

	Frecuencia 0.4	Frecuencia 0.45	Frecuencia 0.5	Frecuencia 0.55	Frecuencia 0.6	Frecuencia 0.65	Frecuencia 0.7	Frecuencia 0.75
Pendiente 1/200	0.012420576	0.013486329	0.015192675	0.017125922	0.019053651	0.021287993	0.023799442	0.026495306
Pendiente 1/100	0.024928029	0.028169026	0.031035469	0.034450488	0.038440243	0.042626348	0.047891357	0.053188469
Pendiente 1/50	0.05207028	0.056872728	0.062536669	0.069382283	0.077180148	0.085936564	0.095617915	0.105818173
Pendiente 1/30	0.091842612	0.098751603	0.10808391	0.117835539	0.128959847	0.14341719	0.158136662	0.173402788
Pendiente 1/20	0.159560152	0.159560152	0.172585178	0.187246902	0.201669639	0.217353209	0.232768452	0.25092606
Pendiente 1/15	0.210212491	0.225852423	0.241492355	0.259199777	0.275909022	0.292564542	0.308336866	0.324946951

Frecuencia 0.8	Frecuencia 0.85	Frecuencia 0.9	Frecuencia 0.95	Frecuencia 1	Frecuencia 1.05	Frecuencia 1.1	Frecuencia 1.15	Frecuencia 1.2	Frecuencia 1.25
0.029577807	0.032785565	0.035918687	0.03893338	0.042642292	0.045926152	0.048970519	0.052546013	0.055030218	0.058460749
0.058972349	0.065277689	0.071458748	0.077487652	0.084566173	0.090990229	0.096844982	0.103842942	0.108632985	0.115173384
0.116136383	0.12799039	0.140038011	0.151542952	0.163202378	0.174548564	0.18444726	0.195709088	0.203965722	0.213539862
0.18842691	0.202612941	0.219181224	0.2342783	0.247142529	0.261527799	0.275002015	0.285066333	0.297164856	0.307049261
0.268060167	0.283865258	0.298680857	0.314835744	0.330140286	0.342937304	0.353274214	0.367169139	0.379277042	0.388797808
0.342330647	0.358548882	0.372606622	0.383730107	0.39733493	0.412487881	0.42461879	0.438126808	0.44965607	0.460963664

Frecuencia 1.3	Frecuencia 1.35	Frecuencia 1.4	Frecuencia 1.45	Frecuencia 1.5	Frecuencia 1.55	Frecuencia 1.6	Frecuencia 1.65	Frecuencia 1.7
0.060486994	0.062858804	0.064636094	0.066633285	0.066774566	0.067572103	0.067727663	0.066479321	0.064984444
0.119046602	0.12435397	0.126968354	0.130141252	0.131328784	0.132009772	0.132177239	0.130337137	0.127394729
0.220497049	0.227642236	0.232076675	0.237069203	0.238322831	0.240959369	0.240385613	0.23829199	0.234353312
0.314977785	0.323350523	0.329010849	0.334994143	0.338275706	0.34015136	0.340692224	0.340813448	0.336797729
0.399964013	0.407520309	0.416062587	0.422075219	0.428018517	0.432105739	0.431624756	0.434168421	0.430798017
0.474559969	0.481845148	0.492969173	0.49867314	0.505203566	0.508043427	0.510564848	0.508411294	0.503317082

ANEXO 2

Juan González Santomé

Frecuencia 1.75	Frecuencia 1.8	Frecuencia 1.85	Frecuencia 1.9	Frecuencia 1.95	Frecuencia 2	Frecuencia 2.05	Frecuencia 2.1	Frecuencia 2.15
0.063200764	0.060361655	0.056667621	0.052686892	0.048116072	0.043137499	0.037887551	0.032145467	0.027443779
0.123578368	0.118131348	0.111877049	0.104311911	0.095512544	0.085822445	0.075538295	0.064917308	0.0543145
0.228053763	0.220703543	0.210771072	0.197983843	0.182770418	0.165597317	0.147072133	0.127519003	0.10743229
0.329712154	0.321928014	0.310633464	0.294928761	0.276733207	0.256004089	0.230849703	0.201517329	0.171051649
0.425047613	0.417219831	0.404118562	0.389203048	0.371226749	0.34732774	0.316860473	0.280769732	0.239618289
0.498956918	0.491134026	0.476692575	0.462339321	0.440619901	0.415581749	0.384323312	0.34553448	0.296446366

Frecuencia 2.2	Frecuencia 2.25	Frecuencia 2.3	Frecuencia 2.35	Frecuencia 2.4
0.02262057	0.018252133	0.01435742	0.011903833	0.011585309
0.044433563	0.035229313	0.028508945	0.023788031	0.023176182
0.086530581	0.069227114	0.055247927	0.047451253	0.045885479
0.140066483	0.111305602	0.088507505	0.076013396	0.073245942
0.197175925	0.155441749	0.123061731	0.104492604	0.100270468
0.242264434	0.19244139	0.148644061	0.121025586	0.115216677

MATRIZ GM
AVERAGE

	Frecuencia 0.4	Frecuencia 0.45	Frecuencia 0.5	Frecuencia 0.55	Frecuencia 0.6	Frecuencia 0.65	Frecuencia 0.7	Frecuencia 0.75
Pendiente 1/200	0.445661563	0.445667546	0.445649213	0.445540287	0.445552049	0.445591943	0.445667481	0.445684505
Pendiente 1/100	0.444812754	0.44478912	0.444877716	0.444954171	0.444972802	0.445051414	0.445142893	0.445266912
Pendiente 1/50	0.441828699	0.441935997	0.442055237	0.442240695	0.442509756	0.442756602	0.443084344	0.44347662
Pendiente 1/30	0.434715096	0.434952722	0.435294387	0.435768598	0.436194322	0.436751287	0.43745966	0.43817356
Pendiente 1/20	0.423426142	0.421034723	0.421607259	0.422321063	0.423013301	0.423831482	0.424549074	0.425141681
Pendiente 1/15	0.400159277	0.400806587	0.401353722	0.401986042	0.402798004	0.403495091	0.403933826	0.404275207

ANEXO 2

Juan González Santomé

Frecuencia 0.8	Frecuencia 0.85	Frecuencia 0.9	Frecuencia 0.95	Frecuencia 1	Frecuencia 1.05	Frecuencia 1.1	Frecuencia 1.15	Frecuencia 1.2	Frecuencia 1.25
0.445698472	0.445791084	0.445810058	0.445825859	0.445924774	0.445932505	0.446004466	0.446052512	0.446073287	0.446123312
0.445389972	0.445510747	0.445677543	0.445843457	0.446033497	0.446221814	0.446413257	0.446595982	0.446764216	0.446897493
0.443837071	0.444298729	0.444741582	0.445218527	0.445661237	0.446081869	0.446463915	0.446818683	0.447097007	0.447293239
0.438824612	0.439463905	0.440077049	0.440535987	0.440847928	0.441082927	0.441237654	0.441226714	0.441156939	0.440991548
0.425676803	0.42605155	0.426125893	0.426094832	0.426000433	0.425618838	0.425280001	0.424750272	0.424306338	0.423774104
0.404233879	0.404135069	0.403823586	0.403420027	0.402835662	0.402439819	0.402328103	0.402094949	0.402268011	0.402436007

Frecuencia 1.3	Frecuencia 1.35	Frecuencia 1.4	Frecuencia 1.45	Frecuencia 1.5	Frecuencia 1.55	Frecuencia 1.6	Frecuencia 1.65	Frecuencia 1.7
0.446143924	0.446186281	0.446222711	0.446242855	0.446220787	0.44620213	0.446161652	0.446089795	0.446054699
0.447032844	0.447150491	0.447194301	0.447208027	0.447182942	0.447092035	0.446959445	0.446798955	0.446578816
0.447428453	0.447491894	0.447455156	0.447439846	0.447284857	0.447074352	0.446804162	0.446549036	0.446199951
0.440765288	0.440507595	0.440237751	0.439929533	0.439579102	0.439351151	0.439094931	0.438882377	0.438700702
0.423501012	0.42310305	0.42299474	0.422736749	0.422470528	0.422389301	0.422317435	0.422238894	0.422115673
0.402827622	0.403315489	0.403715674	0.404166539	0.404536175	0.404641202	0.404868437	0.404957987	0.404821984

Frecuencia 1.75	Frecuencia 1.8	Frecuencia 1.85	Frecuencia 1.9	Frecuencia 1.95	Frecuencia 2	Frecuencia 2.05	Frecuencia 2.1	Frecuencia 2.15
0.446007116	0.44590238	0.445865298	0.445832944	0.445727333	0.445687556	0.445704956	0.445660215	0.445773781
0.446390951	0.446150885	0.445926963	0.44569838	0.445516077	0.445385354	0.445290126	0.445311409	0.445342393
0.445856874	0.445426456	0.444996664	0.444561175	0.44416422	0.443840779	0.443666712	0.443697493	0.443917558
0.438615079	0.438527399	0.43844075	0.43848187	0.438588069	0.438738768	0.439028701	0.439487869	0.44026953
0.422294823	0.422697669	0.42334429	0.42424931	0.425195635	0.426514799	0.428081264	0.429970245	0.432234722
0.40493879	0.405258726	0.405788954	0.406732898	0.4083515	0.41038859	0.413414271	0.416777961	0.420816421

Frecuencia 2.2	Frecuencia 2.25	Frecuencia 2.3	Frecuencia 2.35	Frecuencia 2.4
0.445745029	0.445762809	0.445794119	0.445816119	0.445831614
0.445427261	0.445558532	0.445669329	0.445759026	0.445821402
0.44426642	0.444689938	0.445180945	0.445571466	0.445855913
0.441282497	0.442486196	0.443706997	0.444768977	0.445526848
0.434784265	0.437490209	0.440058071	0.442146009	0.443698174
0.425272276	0.429718229	0.433801015	0.437096926	0.439442925

Anexo 3 – Cartilla de trazado utilizada en Amarcon Octopus Office 3

5.100000

hull-file, generated from geo-structure

4.9960 0.0000 22.0900 0.5760

40

0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136

0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136

0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136

0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136

0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136 0.6136

1		0.9394	2.7272	1.9637	3.1053
-0.5760	100	0.9823	2.7424	2.0064	3.1212
0.0000		1.0250	2.7581	2.0490	3.1371
0.0000	2.5569	1.0677	2.7738	2.0916	3.1529
0.0449	2.5643	1.1103	2.7896	2.1343	3.1688
0.0898	2.5716	1.1530	2.8053	2.1769	3.1846
0.1347	2.5790	1.1957	2.8210	2.2195	3.2005
0.1796	2.5863	1.2384	2.8368	2.2622	3.2165
0.2245	2.5936	1.2811	2.8525	2.3048	3.2324
0.2694	2.6009	1.3238	2.8683	2.3474	3.2483
0.3143	2.6083	1.3665	2.8840	2.3900	3.2643
0.3592	2.6156	1.4092	2.8997	2.4326	3.2802
0.4041	2.6230	1.4518	2.9155	2.4752	3.2962
0.4490	2.6304	1.4945	2.9312	2.5178	3.3121
0.4939	2.6378	1.5372	2.9470	2.5604	3.3281
0.5388	2.6451	1.5799	2.9628	2.6030	3.3440
0.5837	2.6524	1.6225	2.9787	2.6349	3.3760
0.6286	2.6598	1.6651	2.9945	2.6659	3.4093
0.6734	2.6678	1.7078	3.0104	2.6917	3.4467
0.7181	2.6759	1.7504	3.0262	2.7175	3.4842
0.7627	2.6850	1.7931	3.0421	2.7292	3.5281
0.8073	2.6940	1.8357	3.0579	2.7401	3.5722
0.8519	2.7031	1.8784	3.0737	2.7429	3.6176
0.8965	2.7121	1.9211	3.0895	2.7457	3.6630

ANEXO 3

Juan González Santomé

2.7484	3.7084	0.1809	2.4664	1.8215	2.9138
2.7512	3.7538	0.2261	2.4752	1.8644	2.9307
2.7537	3.7992	0.2713	2.4840	1.9072	2.9477
2.7563	3.8447	0.3165	2.4928	1.9500	2.9647
2.7587	3.8901	0.3617	2.5016	1.9928	2.9817
2.7612	3.9355	0.4069	2.5103	2.0356	2.9988
2.7631	3.9810	0.4522	2.5191	2.0783	3.0161
2.7650	4.0264	0.4974	2.5278	2.1210	3.0335
2.7664	4.0719	0.5426	2.5366	2.1636	3.0509
2.7679	4.1174	0.5878	2.5453	2.2063	3.0683
2.7692	4.1629	0.6331	2.5541	2.2479	3.0880
2.7705	4.2083	0.6782	2.5633	2.2894	3.1078
2.7709	4.2538	0.7233	2.5724	2.3307	3.1282
2.7712	4.2993	0.7684	2.5821	2.3719	3.1486
2.7715	4.3448	0.8134	2.5917	2.4132	3.1690
2.7718	4.3903	0.8585	2.6014	2.4545	3.1894
2.7722	4.4358	0.9035	2.6110	2.4957	3.2098
2.7725	4.4813	0.9477	2.6239	2.5370	3.2302
2.7729	4.5268	0.9920	2.6368	2.5782	3.2506
2.7732	4.5723	1.0361	2.6500	2.6194	3.2711
2.7736	4.6178	1.0802	2.6633	2.6551	3.3000
2.7739	4.6633	1.1243	2.6765	2.6904	3.3295
2.7743	4.7088	1.1684	2.6898	2.7236	3.3612
2.7746	4.7543	1.2125	2.7029	2.7567	3.3930
2.7749	4.7998	1.2566	2.7161	2.7790	3.4329
2.7753	4.8453	1.3007	2.7293	2.8002	3.4734
2.7756	4.8908	1.3449	2.7425	2.8101	3.5183
2.7760	4.9363	1.3887	2.7566	2.8199	3.5632
2.7763	4.9817	1.4326	2.7706	2.8286	3.6083
2.7767	5.0272	1.4764	2.7848	2.8370	3.6535
2.7770	5.0727	1.5202	2.7991	2.8388	3.6996
2.7774	5.1182	1.5637	2.8142	2.8407	3.7456
0.0376	100	1.6072	2.8293	2.8425	3.7916
0.0000		1.6501	2.8462	2.8444	3.8377
0.0000	2.4313	1.6930	2.8631	2.8459	3.8837
0.0452	2.4401	1.7358	2.8800	2.8473	3.9297
0.0904	2.4489	1.7787	2.8969	2.8486	3.9758
0.1356	2.4576				

ANEXO 3

Juan González Santomé

2.8499	4.0219	0.5916	2.4119	2.2409	2.9463
2.8510	4.0679	0.6371	2.4231	2.2813	2.9701
2.8522	4.1140	0.6826	2.4346	2.3217	2.9940
2.8524	4.1600	0.7281	2.4460	2.3616	3.0186
2.8527	4.2061	0.7736	2.4575	2.4016	3.0432
2.8529	4.2522	0.8191	2.4689	2.4415	3.0678
2.8532	4.2982	0.8647	2.4802	2.4815	3.0924
2.8533	4.3443	0.9103	2.4913	2.5214	3.1170
2.8534	4.3904	0.9559	2.5027	2.5613	3.1417
2.8535	4.4364	1.0015	2.5141	2.6013	3.1663
2.8535	4.4825	1.0471	2.5255	2.6412	3.1910
2.8535	4.5286	1.0927	2.5370	2.6803	3.2171
2.8536	4.5747	1.1383	2.5484	2.7193	3.2433
2.8536	4.6207	1.1840	2.5597	2.7579	3.2701
2.8537	4.6668	1.2296	2.5712	2.7966	3.2969
2.8537	4.7129	1.2752	2.5826	2.8273	3.3325
2.8537	4.7589	1.3208	2.5941	2.8571	3.3687
2.8538	4.8050	1.3664	2.6056	2.8747	3.4123
2.8538	4.8511	1.4116	2.6187	2.8922	3.4559
2.8539	4.8971	1.4567	2.6317	2.9070	3.5005
2.8539	4.9432	1.5018	2.6452	2.9211	3.5453
2.8539	4.9893	1.5468	2.6587	2.9226	3.5921
2.8540	5.0353	1.5913	2.6739	2.9242	3.6390
0.6512	100	1.6357	2.6892	2.9258	3.6859
0.0000		1.6790	2.7073	2.9273	3.7328
0.0000	2.2623	1.7224	2.7255	2.9287	3.7797
0.0455	2.2738	1.7658	2.7434	2.9301	3.8266
0.0910	2.2855	1.8093	2.7612	2.9315	3.8735
0.1364	2.2971	1.8527	2.7792	2.9328	3.9203
0.1819	2.3088	1.8961	2.7971	2.9339	3.9672
0.2274	2.3204	1.9395	2.8151	2.9350	4.0141
0.2729	2.3320	1.9828	2.8332	2.9351	4.0610
0.3183	2.3436	2.0261	2.8515	2.9352	4.1079
0.3638	2.3551	2.0693	2.8698	2.9353	4.1548
0.4094	2.3665	2.1124	2.8886	2.9355	4.2017
0.4549	2.3779	2.1555	2.9073	2.9354	4.2485
0.5005	2.3892	2.1982	2.9268	2.9353	4.2954
0.5460	2.4006				

ANEXO 3

Juan González Santomé

2.9351	4.3423	0.9788	2.2497	2.6267	3.0095
2.9348	4.3892	1.0247	2.2672	2.6684	3.0359
2.9345	4.4361	1.0707	2.2847	2.7099	3.0622
2.9342	4.4829	1.1169	2.3013	2.7513	3.0886
2.9340	4.5298	1.1631	2.3178	2.7913	3.1171
2.9337	4.5767	1.2093	2.3345	2.8313	3.1457
2.9335	4.6235	1.2555	2.3513	2.8585	3.1865
2.9332	4.6704	1.3013	2.3691	2.8855	3.2276
2.9329	4.7173	1.3472	2.3869	2.9113	3.2694
2.9327	4.7642	1.3929	2.4048	2.9370	3.3112
2.9324	4.8110	1.4386	2.4228	2.9499	3.3587
2.9322	4.8579	1.4839	2.4421	2.9624	3.4062
2.9319	4.9048	1.5292	2.4614	2.9682	3.4552
2.9317	4.9516	1.5741	2.4816	2.9739	3.5042
1.2648	100	1.6190	2.5018	2.9794	3.5532
0.0000		1.6638	2.5221	2.9848	3.6022
0.0000	1.7992	1.7087	2.5423	2.9889	3.6514
0.0442	1.8196	1.7546	2.5599	2.9929	3.7005
0.0884	1.8401	1.8005	2.5775	2.9970	3.7497
0.1326	1.8606	1.8465	2.5950	3.0010	3.7989
0.1768	1.8812	1.8925	2.6124	3.0030	3.8482
0.2204	1.9025	1.9383	2.6303	3.0049	3.8975
0.2641	1.9240	1.9842	2.6482	3.0048	3.9469
0.3079	1.9454	2.0298	2.6665	3.0046	3.9962
0.3520	1.9663	2.0755	2.6849	3.0045	4.0456
0.3962	1.9869	2.1211	2.7032	3.0044	4.0950
0.4405	2.0075	2.1668	2.7217	3.0040	4.1443
0.4852	2.0279	2.2093	2.7467	3.0037	4.1937
0.5298	2.0482	2.2518	2.7717	3.0032	4.2431
0.5744	2.0689	2.2934	2.7982	3.0027	4.2924
0.6189	2.0897	2.3351	2.8247	3.0022	4.3418
0.6633	2.1109	2.3767	2.8513	3.0017	4.3911
0.7078	2.1322	2.4183	2.8778	3.0012	4.4405
0.7523	2.1534	2.4600	2.9041	3.0007	4.4899
0.7968	2.1745	2.5017	2.9305	3.0001	4.5393
0.8423	2.1935	2.5433	2.9568	2.9996	4.5886
0.8877	2.2125	2.5850	2.9832	2.9991	4.6380
0.9333	2.2312				

ANEXO 3

Juan González Santomé

2.9986	4.6874	1.1332	2.0721	2.8792	3.0212
2.9981	4.7367	1.1809	2.0968	2.9138	3.0632
2.9975	4.7861	1.2286	2.1216	2.9483	3.1052
2.9970	4.8355	1.2762	2.1465	2.9711	3.1544
2.9965	4.8849	1.3240	2.1712	2.9932	3.2038
1.8784	102	1.3719	2.1959	3.0042	3.2568
0.0000		1.4199	2.2203	3.0152	3.3098
0.0000	1.0273	1.4680	2.2447	3.0256	3.3629
0.0305	1.0674	1.5161	2.2691	3.0359	3.4160
0.0333	1.0709	1.5644	2.2931	3.0432	3.4696
0.0668	1.1120	1.6146	2.3131	3.0506	3.5232
0.0996	1.1535	1.6649	2.3329	3.0577	3.5769
0.1322	1.1950	1.7156	2.3518	3.0647	3.6305
0.1625	1.2380	1.7664	2.3707	3.0688	3.6845
0.1929	1.2810	1.8172	2.3893	3.0728	3.7384
0.2245	1.3234	1.8681	2.4080	3.0726	3.7925
0.2562	1.3658	1.9187	2.4273	3.0723	3.8465
0.2900	1.4072	1.9693	2.4466	3.0720	3.9006
0.3241	1.4486	2.0200	2.4659	3.0717	3.9547
0.3618	1.4870	2.0706	2.4854	3.0711	4.0088
0.3995	1.5257	2.1182	2.5109	3.0705	4.0629
0.4369	1.5649	2.1658	2.5365	3.0698	4.1170
0.4746	1.6042	2.2118	2.5649	3.0691	4.1711
0.5131	1.6430	2.2578	2.5933	3.0683	4.2251
0.5518	1.6820	2.3035	2.6222	3.0676	4.2792
0.5910	1.7208	2.3492	2.6511	3.0668	4.3333
0.6302	1.7598	2.3951	2.6796	3.0660	4.3874
0.6723	1.7956	2.4411	2.7081	3.0652	4.4415
0.7146	1.8315	2.4872	2.7366	3.0644	4.4956
0.7595	1.8634	2.5332	2.7651	3.0637	4.5497
0.7794	1.8768	2.5791	2.7938	3.0629	4.6038
0.8045	1.8932	2.6251	2.8224	3.0621	4.6580
0.8498	1.9211	2.6711	2.8512	3.0613	4.7121
0.8951	1.9491	2.7172	2.8800	3.0606	4.7662
0.9427	1.9737	2.7629	2.9095	3.0598	4.8203
0.9902	1.9983	2.8084	2.9392	2.4920	102
1.0379	2.0228	2.8438	2.9801	0.0000	
1.0855	2.0474			0.0000	0.1797

ANEXO 3

Juan González Santomé

0.0260	0.2565	1.2503	1.9191	3.0553	3.1463
0.0520	0.3243	1.3026	1.9518	3.0678	3.2055
0.0763	0.3867	1.3550	1.9841	3.0792	3.2649
0.0947	0.4459	1.4079	2.0152	3.0904	3.3243
0.1097	0.5015	1.4607	2.0461	3.0992	3.3842
0.1239	0.5536	1.5136	2.0763	3.1079	3.4440
0.1390	0.6027	1.5669	2.1056	3.1159	3.5039
0.1533	0.6498	1.6217	2.1318	3.1237	3.5639
0.1755	0.6930	1.6765	2.1579	3.1252	3.6243
0.1934	0.7287	1.7315	2.1834	3.1266	3.6848
0.1984	0.7396	1.7865	2.2089	3.1259	3.7452
0.2294	0.8127	1.8416	2.2340	3.1253	3.8057
0.2596	0.8801	1.8966	2.2591	3.1245	3.8662
0.2896	0.9428	1.9514	2.2847	3.1238	3.9266
0.3187	1.0020	2.0062	2.3103	3.1229	3.9871
0.3485	1.0577	2.0607	2.3364	3.1221	4.0475
0.3775	1.1113	2.1151	2.3625	3.1212	4.1080
0.4094	1.1612	2.1676	2.3923	3.1203	4.1684
0.4404	1.2101	2.2201	2.4220	3.1197	4.2289
0.4703	1.2580	2.2726	2.4519	3.1192	4.2893
0.5008	1.3044	2.3251	2.4817	3.1187	4.3498
0.5325	1.3495	2.3776	2.5116	3.1182	4.4103
0.5648	1.3936	2.4301	2.5414	3.1177	4.4707
0.6026	1.4336	2.4825	2.5712	3.1172	4.5312
0.6399	1.4735	2.5350	2.6011	3.1167	4.5917
0.6779	1.5126	2.5877	2.6311	3.1163	4.6522
0.6918	1.5270	2.6403	2.6611	3.1158	4.7127
0.7224	1.5577	2.6930	2.6913	3.1153	4.7731
0.7742	1.6008	2.7455	2.7214	3.1056	103
0.8256	1.6429	2.7959	2.7548	0.0000	
0.8797	1.6788	2.8461	2.7882	0.0000	0.0479
0.9334	1.7144	2.8871	2.8327	0.0261	0.1017
0.9866	1.7496	2.9280	2.8773	0.0519	0.1554
1.0396	1.7844	2.9636	2.9260	0.0600	0.1729
1.0926	1.8185	2.9986	2.9750	0.0779	0.2124
1.1453	1.8523	3.0212	3.0309	0.1037	0.2707
1.1979	1.8859	3.0429	3.0871	0.1268	0.3294
				0.1498	0.3876

ANEXO 3

Juan González Santomé

0.1728	0.4452	1.4241	1.8355	3.0378	2.8327
0.1953	0.5027	1.4759	1.8689	3.0706	2.8849
0.2218	0.5581	1.5276	1.9023	3.0846	2.9451
0.2484	0.6132	1.5810	1.9332	3.0987	3.0053
0.2783	0.6663	1.6220	1.9568	3.1116	3.0657
0.3082	0.7193	1.6345	1.9640	3.1246	3.1261
0.3380	0.7721	1.6883	1.9945	3.1352	3.1870
0.3678	0.8249	1.7422	2.0250	3.1459	3.2479
0.3808	0.8460	1.7968	2.0540	3.1553	3.3090
0.4001	0.8778	1.8514	2.0831	3.1646	3.3701
0.4324	0.9315	1.9063	2.1115	3.1723	3.4314
0.4655	0.9846	1.9612	2.1399	3.1799	3.4928
0.4987	1.0373	2.0161	2.1684	3.1792	3.5546
0.5342	1.0883	2.0710	2.1968	3.1785	3.6164
0.5699	1.1390	2.1257	2.2256	3.1774	3.6782
0.6084	1.1874	2.1803	2.2544	3.1764	3.7400
0.6472	1.2356	2.2347	2.2837	3.1755	3.8018
0.6868	1.2829	2.2890	2.3131	3.1745	3.8636
0.7263	1.3302	2.3434	2.3424	3.1735	3.9254
0.7735	1.3698	2.3977	2.3717	3.1725	3.9872
0.8208	1.4092	2.4521	2.4009	3.1715	4.0490
0.8697	1.4466	2.5065	2.4302	3.1706	4.1108
0.9187	1.4840	2.5609	2.4595	3.1703	4.1726
0.9684	1.5202	2.6152	2.4888	3.1701	4.2344
1.0182	1.5564	2.6696	2.5180	3.1699	4.2962
1.0686	1.5918	2.7240	2.5472	3.1698	4.3579
1.1190	1.6272	2.7784	2.5764	3.1696	4.4197
1.1694	1.6624	2.8329	2.6055	3.1694	4.4815
1.2199	1.6977	2.8806	2.6445	3.1692	4.5432
1.2709	1.7323	2.9278	2.6841	3.1690	4.6050
1.3218	1.7668	2.9662	2.7324	3.1688	4.6668
1.3730	1.8011	3.0045	2.7808	3.1686	4.7285

Anexo 4 – Valores de masa añadida (A44, A42, A22) 4

Encounter Freq [rad/s]	Added Mass [Tm ²]	Damping [Tm ² /s]			
			2.049192	140.328100	258.615900
			2.081515	137.365400	258.866200
			2.113838	134.558900	258.916100
			2.146162	131.902000	258.780900
			2.178485	129.388400	258.474900
			2.210808	127.011500	258.011700
			2.243131	124.765200	257.403400
			2.275455	122.643100	256.661500
			2.307778	120.639400	255.796800
			2.340101	118.748300	254.818800
			2.372424	116.964100	253.736900
			2.404747	115.281800	252.559200
			2.437071	113.696000	251.293500
			2.469394	112.201900	249.947200
			2.501717	110.795000	248.526700
			2.534040	109.470700	247.038400
			2.566364	108.225000	245.487900
			2.598687	107.053800	243.880500
			2.631010	105.953300	242.221300
			2.663333	104.920000	240.514700
			2.695656	103.950500	238.765100
			2.727980	103.041500	236.976500
			2.760303	102.189900	235.152500
			2.792626	101.393000	233.296700
			2.824949	100.647900	231.412300
			2.857273	99.952070	229.502400
			2.889596	99.303000	227.569900
			2.921919	98.698360	225.617300
			2.954242	98.135930	223.647200
			2.986566	97.613620	221.662000
			3.018889	97.129390	219.663800
			3.051212	96.681390	217.654800
			3.083535	96.267810	215.636800
			3.115858	95.886920	213.611800
			3.148182	95.537110	211.581500
			3.180505	95.216830	209.547500
			3.212828	94.924590	207.511200
			3.245151	94.659030	205.474300
			3.277475	94.418800	203.437900
			3.309798	94.202650	201.403400
			3.342121	94.009380	199.372100
			3.374444	93.837840	197.345000
			3.406767	93.686880	195.323200
			3.439091	93.555470	193.307700
			3.471414	93.442740	191.299400
			3.503737	93.347810	189.299500
			3.536060	93.269600	187.308500
			3.568384	93.206840	185.326700
			3.600707	93.158710	183.354800
			3.633030	93.125720	181.395100
			3.665353	93.108440	179.449700
			3.697677	93.103880	177.516500
			3.730000	93.105740	175.589500

A42

Encounter Freq [rad/s]	Added Mass [Tm]	Damping [Tm/s]	Encounter Freq [rad/s]	Added Mass [Tm]	Damping [Tm/s]
0.530000	- 155.189900	- 2.518079	2.146162	- 64.221310	- 192.703300
0.562323	- 157.014800	- 3.423330	2.178485	- 62.357280	- 192.279700
0.594647	- 158.861400	- 4.449594	2.210808	- 60.599480	- 191.739300
0.626970	- 160.750500	- 5.716095	2.243131	- 58.942890	- 191.091500
0.659293	- 162.674400	- 7.292424	2.275455	- 57.382510	- 190.345600
0.691616	- 164.594100	- 9.193288	2.307778	- 55.913610	- 189.509900
0.723939	- 166.469600	- 11.434000	2.340101	- 54.531570	- 188.592100
0.756263	- 168.264100	- 14.047240	2.372424	- 53.231900	- 187.599400
0.788586	- 169.942000	- 17.070920	2.404747	- 52.010430	- 186.538300
0.820909	- 171.463900	- 20.534350	2.437071	- 50.863020	- 185.414800
0.853232	- 172.786100	- 24.455150	2.469394	- 49.785840	- 184.234700
0.885556	- 173.864600	- 28.847950	2.501717	- 48.775200	- 183.003000
0.917879	- 174.658500	- 33.713710	2.534040	- 47.827550	- 181.724600
0.950202	- 175.128200	- 39.047830	2.566364	- 46.939600	- 180.403800
0.982525	- 175.238500	- 44.835160	2.598687	- 46.108170	- 179.044800
1.014848	- 174.962600	- 51.043030	2.631010	- 45.330280	- 177.651300
1.047172	- 174.275800	- 57.635110	2.663333	- 44.603120	- 176.226700
1.079495	- 173.167500	- 64.558810	2.695656	- 43.923950	- 174.774400
1.111818	- 171.633700	- 71.753590	2.727980	- 43.290290	- 173.297300
1.144141	- 169.677600	- 79.154560	2.760303	- 42.699710	- 171.798200
1.176465	- 167.317700	- 86.688030	2.792626	- 42.149920	- 170.279700
1.208788	- 164.574800	- 94.279350	2.824949	- 41.638820	- 168.744200
1.241111	- 161.480700	- 101.855400	2.857273	- 41.164310	- 167.194000
1.273434	- 158.073700	- 109.344000	2.889596	- 40.724530	- 165.631000
1.305758	- 154.393700	- 116.676900	2.921919	- 40.317620	- 164.057200
1.338081	- 150.486200	- 123.796500	2.954242	- 39.941860	- 162.474500
1.370404	- 146.397000	- 130.647600	2.986566	- 39.595650	- 160.884600
1.402727	- 142.170600	- 137.187300	3.018889	- 39.277410	- 159.289000
1.435050	- 137.850800	- 143.381700	3.051212	- 38.985690	- 157.689100
1.467374	- 133.479400	- 149.201600	3.083535	- 38.719120	- 156.086400
1.499697	- 129.092500	- 154.631800	3.115858	- 38.476360	- 154.482100
1.532020	- 124.724900	- 159.660400	3.148182	- 38.256190	- 152.877400
1.564343	- 120.405700	- 164.283500	3.180505	- 38.057420	- 151.273500
1.596667	- 116.159300	- 168.504600	3.212828	- 37.878930	- 149.671400
1.628990	- 112.008000	- 172.328900	3.245151	- 37.719670	- 148.072100
1.661313	- 107.967800	- 175.768400	3.277475	- 37.578590	- 146.476400
1.693636	- 104.052500	- 178.836600	3.309798	- 37.454800	- 144.885300
1.725960	- 100.272500	- 181.549400	3.342121	- 37.347360	- 143.299500
1.758283	- 96.634280	- 183.924700	3.374444	- 37.255420	- 141.719800
1.790606	- 93.143480	- 185.980600	3.406767	- 37.178120	- 140.147000
1.822929	- 89.801990	- 187.736300	3.439091	- 37.114690	- 138.581500
1.855252	- 86.610680	- 189.210800	3.471414	- 37.064460	- 137.024100
1.887576	- 83.568980	- 190.423000	3.503737	- 37.026780	- 135.475600
1.919899	- 80.674570	- 191.390900	3.536060	- 37.000850	- 133.936100
1.952222	- 77.924760	- 192.132300	3.568384	- 36.985770	- 132.405800
1.984545	- 75.315710	- 192.664000	3.600707	- 36.980900	- 130.885200
2.016869	- 72.843160	- 193.001900	3.633030	- 36.986570	- 129.375900
2.049192	- 70.502530	- 193.161200	3.665353	- 37.003150	- 127.879800
2.081515	- 68.288730	- 193.155800	3.697677	- 37.028530	- 126.394900
2.113838	- 66.196730	- 192.999100	3.730000	- 37.058350	- 124.915600

Encounter Freq [rad/s]	Added Mass [T]	Damping [T/s]	Encounter Freq [rad/s]	Added Mass [T]	Damping [T/s]
0.530000	150.991900	2.014914	2.146162	77.588830	160.457700
0.562323	152.465300	2.738242	2.178485	75.993520	160.190600
0.594647	153.956900	3.558060	2.210808	74.487140	159.818100
0.626970	155.484100	4.569430	2.243131	73.065820	159.348500
0.659293	157.041300	5.827841	2.275455	71.725650	158.790000
0.691616	158.597700	7.345013	2.307778	70.462920	158.150000
0.723939	160.121400	9.133183	2.340101	69.273920	157.435200
0.756263	161.583800	11.218590	2.372424	68.155040	156.652300
0.788586	162.957000	13.631730	2.404747	67.102880	155.806900
0.820909	164.210000	16.396390	2.437071	66.114060	154.904700
0.853232	165.308400	19.527330	2.469394	65.185420	153.950800
0.885556	166.217700	23.036990	2.501717	64.313880	152.949800
0.917879	166.905400	26.927330	2.534040	63.496510	151.906300
0.950202	167.340000	31.196100	2.566364	62.730520	150.824200
0.982525	167.493300	35.832800	2.598687	62.013240	149.707300
1.014848	167.343500	40.813360	2.631010	61.342140	148.559200
1.047172	166.870400	46.110820	2.663333	60.714820	147.382900
1.079495	166.064200	51.685340	2.695656	60.128970	146.181700
1.111818	164.920500	57.490860	2.727980	59.582430	144.958200
1.144141	163.440500	63.477630	2.760303	59.073120	143.715000
1.176465	161.636700	69.588510	2.792626	58.599080	142.454500
1.208788	159.524000	75.765560	2.824949	58.158480	141.179100
1.241111	157.125800	81.951260	2.857273	57.749510	139.890700
1.273434	154.470500	88.088400	2.889596	57.370530	138.591300
1.305758	151.588200	94.122630	2.921919	57.019960	137.282700
1.338081	148.513500	100.007000	2.954242	56.696270	135.966500
1.370404	145.281400	105.696400	2.986566	56.398050	134.644400
1.402727	141.926400	111.154600	3.018889	56.123940	133.317900
1.435050	138.482900	116.352400	3.051212	55.872650	131.988100
1.467374	134.983700	121.264000	3.083535	55.643000	130.656300
1.499697	131.457700	125.874500	3.115858	55.433800	129.323900
1.532020	127.932800	130.171400	3.148182	55.243970	127.991700
1.564343	124.432900	134.148600	3.180505	55.072480	126.660900
1.596667	120.978400	137.806100	3.212828	54.918330	125.332300
1.628990	117.588000	141.145300	3.245151	54.780600	124.006900
1.661313	114.275700	144.173000	3.277475	54.658380	122.685400
1.693636	111.053600	146.897800	3.309798	54.550850	121.368600
1.725960	107.931600	149.330100	3.342121	54.457210	120.057100
1.758283	104.916100	151.482600	3.374444	54.376720	118.751700
1.790606	102.012800	153.368100	3.406767	54.308620	117.452800
1.822929	99.224620	155.000800	3.439091	54.252230	116.160900
1.855252	96.553380	156.394900	3.471414	54.206970	114.876800
1.887576	93.999780	157.564600	3.503737	54.172260	113.600900
1.919899	91.562960	158.524100	3.536060	54.147420	112.333500
1.952222	89.241770	159.287500	3.568384	54.131660	111.074600
1.984545	87.033940	159.867900	3.600707	54.124440	109.824500
2.016869	84.936750	160.278400	3.633030	54.126000	108.584700
2.049192	82.947230	160.531300	3.665353	54.136640	107.356900
2.081515	81.061820	160.638100	3.697677	54.154580	106.139000
2.113838	79.276960	160.610100	3.730000	54.176200	104.926200

Anexo 5 – Script modelo matemático ensayo de decaimiento

5

Script

```

GZ = [0.588 0.571 0.555 0.539 0.522 0.505 0.488
0.472 0.455 0.438 0.421 0.404 0.387 0.37
0.354 0.337 0.321 0.304 0.288 0.272 0.257
0.242 0.227 0.212 0.197 0.182 0.168 0.153
0.138 0.124 0.109 0.094 0.079 0.065 0.05
0.036 0.021 0.007 -0.007 -0.02 -0.034 -0.047 -
0.06 -0.073 -0.085 -0.096 -0.108 -0.119 -0.129 -
0.139 -0.148 -0.157 -0.165 -0.173 -0.18 -0.186 -
0.192 -0.197 -0.201 -0.205 -0.207 -0.209 -0.21 -
0.21 -0.209 -0.208 -0.205 -0.202 -0.197 -0.192 -
0.187 -0.181 -0.176 -0.17 -0.165 -0.16 -0.154 -
0.149 -0.144 -0.138 -0.133 -0.127 -0.122 -0.116 -
0.11 -0.105 -0.099 -0.093 -0.086 -0.08 -0.073 -
0.067 -0.06 -0.053 -0.046 -0.038 -0.031 -0.023 -
0.016 -0.008 0 0.008 0.015 0.023 0.031 0.038
0.045 0.053 0.06 0.066 0.073 0.08 0.086
0.092 0.098 0.104 0.11 0.116 0.121 0.127
0.132 0.137 0.143 0.148 0.153 0.159 0.164
0.169 0.175 0.18 0.186 0.191 0.196 0.201
0.204 0.207 0.209 0.209 0.209 0.208 0.206
0.204 0.2 0.196 0.191 0.185 0.179 0.172 0.165
0.156 0.148 0.138 0.128 0.118 0.107 0.096
0.084 0.072 0.059 0.046 0.033 0.02 0.006 -
0.008 -0.022 -0.036 -0.051 -0.066 -0.08 -0.095 -
0.11 -0.125 -0.139 -0.154 -0.169 -0.183 -0.198 -
0.213 -0.227 -0.242 -0.258 -0.273 -0.289 -0.305 -
0.321 -0.337 -0.354 -0.371 -0.388 -0.404 -0.421 -
0.438 -0.455 -0.472 -0.489 -0.505 -0.522 -0.538 -
0.555 -0.571 -0.587];
Angulos_GZ = [-100:1:100];
Ensayos = [0.260770429, 0.473566103, 0.189217462,
0.591406719, 0.273096398, 0.33366332, 0.317772376];

MATRIZ_1=[];
MATRIZ_2=[];
MATRIZ_3=[];
MATRIZ_4=[];
MATRIZ_5=[];
MATRIZ_6=[];

```

```

MATRIZ_7=[];

Matriz_ensayos = xlsread ('Ensayos_unidos' , 'Ensayos' ,
'AT6:AZ3267');

REAL_1 = Matriz_ensayos(:,1);
REAL_2 = Matriz_ensayos(:,2);
REAL_3 = Matriz_ensayos(:,3);
REAL_4 = Matriz_ensayos(:,4);
REAL_5 = Matriz_ensayos(:,5);
REAL_6 = Matriz_ensayos(:,6);
REAL_7 = Matriz_ensayos(:,7);

t=(0:0.077459667:252.6734);

MATRIZ_AMP=[];
w_n = 0.941;

g=9.81;

for j=1:length(Ensayos)

    MATRIZ_AMP=[];

        [t,y]=ode45 (@(t, y)
Ecuacion_Resonancia_Parametrica_Decaimiento(t,y,GZ,
Angulos_GZ), [0:0.077459667:252.6734],[Ensayos(j),0]);

    MATRIZ_AMP=[MATRIZ_AMP y(:,1)];

    if j==1
MATRIZ_1 = MATRIZ_AMP;
[Maximosyminimos1,T1]=f_findextr(t,MATRIZ_1);
end
    if j==2
MATRIZ_2 = MATRIZ_AMP;
[Maximosyminimos2,T2]=f_findextr(t,MATRIZ_2);
end
    if j==3
MATRIZ_3 = MATRIZ_AMP;
[Maximosyminimos3,T3]=f_findextr(t,MATRIZ_3);
end

```

```

    if j==4
    MATRIZ_4 = MATRIZ_AMP;
    [Maximosyminimos4,T4]=f_findextr(t,MATRIZ_4);
    end
    if j==5
    MATRIZ_5 = MATRIZ_AMP;
    [Maximosyminimos5,T5]=f_findextr(t,MATRIZ_5);
    end
    if j==6
    MATRIZ_6 = MATRIZ_AMP;
    [Maximosyminimos6,T6]=f_findextr(t,MATRIZ_6);
    end
    if j==7
    MATRIZ_7 = MATRIZ_AMP;
    [Maximosyminimos7,T7]=f_findextr(t,MATRIZ_7);
    end

```

end

Función

```

function
dydt=Ecuacion_Resonancia_Parametrica_Decaimiento(t,y,GZ,Angulos_GZ)

desplazamiento=184.983;
w_n=0.941;
A44=637.10;
g=9.81;
B44a=6.8714;
B44b=516.2276;

GZ_interp = interp1(Angulos_GZ,GZ,y(1)*180/pi);

C44 = desplazamiento*g*GZ_interp;

Ixx=(g*desplazamiento*0.446/w_n^2)-A44;
dydt=zeros(2,1);
dydt(1)=y(2);
dydt(2)=(-(C44)-
(B44a*y(2)+B44b*y(2)*abs(y(2))))/(Ixx+A44);

```

Anexo 6 – Ejemplo de matrices GZ ⁶

Pendiente 1/200 Frecuencia 0,4

GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ
-0.18586155	-0.185721508	-0.18563	-0.18564885	-0.1857	-0.186	-0.186	-0.1864	-0.1867	-0.187	-0.1872	-0.1874	-0.187	-0.187	-0.187	-0.187	-0.187	-0.187	-0.187	-0.1864	-0.1861
-0.1320982	-0.131892554	-0.13177	-0.13175456	-0.1318	-0.132	-0.132	-0.1326	-0.1329	-0.1332	-0.1334	-0.1337	-0.134	-0.134	-0.134	-0.134	-0.1333	-0.133	-0.1327	-0.1324	-0.1324
-0.07293488	-0.072759269	-0.07266	-0.07263397	-0.0727	-0.073	-0.073	-0.0733	-0.0736	-0.0738	-0.074	-0.0742	-0.074	-0.074	-0.074	-0.074	-0.0739	-0.074	-0.0734	-0.0732	-0.0732
-3.9933E-05	-3.80828E-05	-4.3E-05	-5.7E-05	-5E-05	-4E-05	-6E-05	-6E-05	-4E-05	-5E-05	-6E-05	-6E-05	-8E-05	-5E-05	-8E-05	-8E-05	-8E-05	-8E-05	-8E-05	-4E-05	-5E-05
0.072523303	0.072351944	0.072251	0.07223005	0.07229	0.0724	0.073	0.0729	0.07314	0.07339	0.07361	0.07378	0.0739	0.0739	0.0738	0.0737	0.0735	0.0733	0.073	0.073	0.07275
0.131429245	0.131226545	0.13111	0.13109041	0.13117	0.1313	0.132	0.1319	0.1322	0.1325	0.13276	0.13296	0.1331	0.1331	0.133	0.1329	0.1326	0.1323	0.132	0.132	0.1317
0.185071689	0.18490601	0.184823	0.18483044	0.18493	0.1851	0.185	0.1856	0.1859	0.18617	0.1864	0.18657	0.1866	0.1866	0.1866	0.1866	0.1864	0.1861	0.1859	0.18558	0.1853
0.205279554	0.205170038	0.205181	0.20531278	0.20555	0.2059	0.206	0.2066	0.207	0.2073	0.20752	0.20763	0.2076	0.2075	0.2072	0.2069	0.2066	0.2062	0.20581	0.2055	0.2055
0.146304544	0.146287321	0.146392	0.14661043	0.14692	0.1473	0.148	0.1481	0.1484	0.14865	0.14879	0.1488	0.1487	0.1485	0.1482	0.1478	0.1474	0.147	0.14669	0.14644	0.14644
0.032050948	0.032141193	0.032329	0.03259746	0.03292	0.0333	0.034	0.0339	0.03409	0.03421	0.03422	0.03412	0.0339	0.0337	0.0333	0.033	0.0327	0.0324	0.03219	0.03207	0.03207
-0.11068522	-0.110493939	-0.11023	-0.10991107	-0.1096	-0.109	-0.109	-0.1088	-0.1087	-0.1087	-0.1088	-0.109	-0.109	-0.11	-0.11	-0.11	-0.1105	-0.111	-0.1108	-0.1108	-0.1108
-0.25866821	-0.258490554	-0.25823	-0.25790966	-0.2576	-0.257	-0.257	-0.2567	-0.2566	-0.2565	-0.2566	-0.2568	-0.257	-0.257	-0.258	-0.258	-0.2584	-0.259	-0.2587	-0.2587	-0.2587
-0.42231901	-0.42209458	-0.42179	-0.4214319	-0.4211	-0.421	-0.42	-0.4202	-0.4201	-0.4201	-0.4202	-0.4204	-0.421	-0.421	-0.421	-0.422	-0.4221	-0.422	-0.4224	-0.4224	-0.4224
-0.58838582	-0.588113383	-0.58776	-0.58736223	-0.587	-0.587	-0.586	-0.5861	-0.586	-0.586	-0.5862	-0.5865	-0.587	-0.587	-0.588	-0.588	-0.5883	-0.589	-0.5886	-0.5886	-0.5886
-0.73935513	-0.739083592	-0.73873	-0.73832495	-0.7379	-0.738	-0.737	-0.737	-0.7369	-0.7369	-0.7371	-0.7374	-0.738	-0.738	-0.739	-0.739	-0.7392	-0.739	-0.7396	-0.7395	-0.7395
-0.86073772	-0.860482082	-0.86013	-0.85972927	-0.8593	-0.859	-0.859	-0.8583	-0.8582	-0.8582	-0.8583	-0.8586	-0.859	-0.859	-0.86	-0.86	-0.8605	-0.861	-0.8609	-0.8609	-0.8609
-0.93916414	-0.938928718	-0.93859	-0.93818373	-0.9377	-0.937	-0.937	-0.9367	-0.9365	-0.9365	-0.9366	-0.9368	-0.937	-0.938	-0.938	-0.938	-0.9388	-0.939	-0.9392	-0.9393	-0.9393
-0.95085107	-0.950648958	-0.95033	-0.94991767	-0.9495	-0.949	-0.949	-0.9482	-0.948	-0.9479	-0.948	-0.9483	-0.949	-0.949	-0.949	-0.949	-0.95	-0.9503	-0.951	-0.9508	-0.9509
-0.86736873	-0.867224837	-0.86695	-0.86657324	-0.8661	-0.866	-0.865	-0.8648	-0.8646	-0.8644	-0.8644	-0.8645	-0.865	-0.865	-0.866	-0.866	-0.8666	-0.867	-0.8672	-0.8674	-0.8674
-0.6417327	-0.641640401	-0.64151	-0.64132366	-0.6411	-0.641	-0.641	-0.6405	-0.6404	-0.6403	-0.6403	-0.6404	-0.641	-0.641	-0.641	-0.641	-0.6413	-0.642	-0.6417	-0.6417	-0.6417
-0.31811898	-0.31808161	-0.31803	-0.31796261	-0.3179	-0.318	-0.318	-0.3177	-0.3177	-0.3177	-0.3177	-0.3177	-0.318	-0.318	-0.318	-0.318	-0.3181	-0.318	-0.3181	-0.3181	-0.3181
0.000817404	0.000816762	0.000817	0.00081739	0.00082	0.0008	8E-04	0.0008	0.00083	0.00083	0.00083	0.00083	0.00083	0.00083	0.0008	0.0008	0.0008	0.0035	0.0008	0.0035	0.00082

ANEXO 6

Juan González Santomé

Pendiente 1/50 Frecuencia 0,8

GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ
-0.180061912	-0.17822	-0.1772	-0.17708	-0.17804	-0.17987	-0.18233	-0.18534	-0.18849	-0.19141	-0.19385	-0.19553	-0.19629	-0.19614	-0.19503	-0.19323	-0.19087	-0.18816	-0.18529	-0.18256	
-0.126519202	-0.12456	-0.12336	-0.12312	-0.12388	-0.12555	-0.128	-0.13095	-0.13406	-0.13703	-0.13953	-0.14132	-0.14225	-0.14226	-0.1414	-0.13977	-0.13751	-0.13483	-0.13194	-0.12909	
-0.068442445	-0.06688	-0.06597	-0.06576	-0.06627	-0.06747	-0.06933	-0.07173	-0.07427	-0.07671	-0.07878	-0.08029	-0.08111	-0.0812	-0.08058	-0.07933	-0.07748	-0.07529	-0.07289	-0.07053	
-1.62834E-05	-1.1E-05	-4.6E-06	-5.4E-06	-5.8E-06	-9.7E-06	-1.3E-05	-3.5E-05	-6.1E-05	-9.4E-05	-0.00011	-0.00018	-0.00012	-0.00019	-0.00021	-0.00019	-0.00015	-9.9E-05	-7.5E-05	-3.9E-05	
0.068151792	0.066613	0.065719	0.065509	0.066012	0.067202	0.069032	0.071335	0.073837	0.076239	0.078276	0.079749	0.080543	0.080623	0.080011	0.078774	0.077016	0.074872	0.072525	0.070201	
0.125907815	0.123973	0.122781	0.122535	0.123285	0.124938	0.127364	0.130281	0.13337	0.136307	0.138782	0.140552	0.141464	0.141469	0.140607	0.138985	0.136753	0.134101	0.131245	0.128429	
0.179284605	0.177496	0.176449	0.176365	0.177268	0.17907	0.181506	0.184486	0.187622	0.190565	0.192993	0.194658	0.195413	0.195225	0.194164	0.192371	0.190028	0.187335	0.184498	0.181729	
0.193358429	0.191007	0.190195	0.191011	0.193397	0.19713	0.201881	0.206951	0.212117	0.216712	0.220255	0.222388	0.222922	0.221853	0.219334	0.215637	0.211119	0.206182	0.201262	0.196804	
0.131944305	0.129682	0.129194	0.130556	0.133683	0.138275	0.143831	0.149594	0.155319	0.160159	0.16365	0.165484	0.165532	0.163877	0.160686	0.15634	0.151216	0.145707	0.140303	0.135731	
0.018323275	0.016754	0.016827	0.018583	0.021871	0.026367	0.031603	0.036664	0.041663	0.045768	0.048563	0.049787	0.049359	0.047369	0.044053	0.039748	0.034861	0.029811	0.025042	0.021328	
-0.123835417	-0.12482	-0.12428	-0.12223	-0.11883	-0.11442	-0.10946	-0.10494	-0.10053	-0.09702	-0.09481	-0.09411	-0.09497	-0.09727	-0.10069	-0.10497	-0.10965	-0.11429	-0.11852	-0.12195	
-0.273431452	-0.27396	-0.27334	-0.2711	-0.26744	-0.26275	-0.25799	-0.25275	-0.24801	-0.24429	-0.24194	-0.2412	-0.24208	-0.24446	-0.24807	-0.25256	-0.25753	-0.26256	-0.26717	-0.27093	
-0.437798963	-0.43805	-0.43712	-0.43456	-0.43063	-0.4257	-0.42079	-0.41543	-0.41063	-0.40688	-0.40456	-0.40391	-0.40499	-0.40767	-0.41166	-0.41655	-0.42187	-0.42711	-0.43178	-0.43547	
-0.604970325	-0.60517	-0.60395	-0.60104	-0.59675	-0.59186	-0.58624	-0.58072	-0.57582	-0.57203	-0.56969	-0.56907	-0.57024	-0.57313	-0.57743	-0.58272	-0.58845	-0.59404	-0.59895	-0.60272	
-0.756351506	-0.75659	-0.75532	-0.75236	-0.74801	-0.74302	-0.73731	-0.73167	-0.72662	-0.72265	-0.72017	-0.71943	-0.72056	-0.72345	-0.72784	-0.73328	-0.73919	-0.74499	-0.7501	-0.75402	
-0.878021483	-0.87874	-0.87755	-0.87459	-0.87018	-0.86473	-0.85904	-0.85312	-0.84774	-0.84343	-0.84063	-0.83968	-0.84069	-0.84361	-0.84813	-0.8538	-0.86001	-0.86613	-0.87155	-0.87574	
-0.957338132	-0.95827	-0.9572	-0.95427	-0.94974	-0.9441	-0.93779	-0.93167	-0.92582	-0.92	-0.91677	-0.91547	-0.91632	-0.91926	-0.92397	-0.92998	-0.93661	-0.94424	-0.95009	-0.95445	
-0.970383368	-0.97167	-0.97081	-0.96791	-0.96329	-0.95736	-0.95065	-0.94373	-0.93741	-0.93195	-0.92813	-0.92638	-0.92695	-0.92983	-0.93473	-0.9411	-0.94827	-0.95545	-0.96183	-0.96701	
-0.886652798	-0.88835	-0.88789	-0.88536	-0.88103	-0.87527	-0.86857	-0.86152	-0.85476	-0.84896	-0.84468	-0.84252	-0.84271	-0.84522	-0.84981	-0.85599	-0.86313	-0.87053	-0.87732	-0.88287	
-0.650623838	-0.65151	-0.65141	-0.65036	-0.64845	-0.64583	-0.64269	-0.63921	-0.63586	-0.63292	-0.63065	-0.6294	-0.62935	-0.63052	-0.63278	-0.63584	-0.63935	-0.64296	-0.64612	-0.6488	
-0.321039082	-0.32127	-0.32116	-0.32074	-0.32006	-0.3192	-0.31824	-0.31724	-0.31629	-0.31546	-0.31482	-0.31444	-0.31445	-0.3148	-0.31547	-0.31643	-0.31753	-0.31864	-0.31966	-0.32049	
0.000754915	0.000742	0.000738	0.000742	0.000753	0.000771	0.000794	0.000821	0.000847	0.000872	0.000892	0.000906	0.003661	0.000907	0.000895	0.000876	0.003553	0.003484	0.000798	0.000774	

ANEXO 6

Juan González Santomé

Pendiente 1/15 Frecuencia 2,4

GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ
-0.18237	-0.1832	-0.1838	-0.18426	-0.18471	-0.18527	-0.18604	-0.18692	-0.18767	-0.18807	-0.18789	-0.18704	-0.18551	-0.1836	-0.18177	-0.18046	-0.17988	-0.17994	-0.18052	-0.18143	
-0.13184	-0.13176	-0.13174	-0.1318	-0.13195	-0.13218	-0.13248	-0.13284	-0.13319	-0.1335	-0.13384	-0.13417	-0.13424	-0.13393	-0.13339	-0.13289	-0.13253	-0.13225	-0.13206	-0.13194	
-0.07536	-0.07454	-0.07354	-0.07242	-0.07119	-0.06989	-0.06862	-0.06767	-0.06751	-0.06894	-0.07067	-0.07224	-0.07344	-0.07425	-0.07473	-0.07506	-0.0754	-0.07582	-0.07606	-0.0759	
-0.00039	-0.00025	-0.0002	-7.1E-05	-1.3E-05	-3.2E-06	-2.1E-06	-1.4E-06	-7.4E-07	-7.3E-07	-1.2E-06	-2.4E-06	-3E-06	-1.9E-05	-0.00012	-0.00023	-0.0003	-0.00029	-0.00031	-0.0003	
0.074612	0.073891	0.07301	0.072005	0.070884	0.069669	0.068453	0.067527	0.06742	0.068804	0.070517	0.072029	0.073152	0.073849	0.074213	0.074418	0.074655	0.075018	0.075224	0.075087	
0.130927	0.130914	0.130976	0.13112	0.131345	0.131643	0.131994	0.132378	0.132745	0.133036	0.133328	0.133638	0.133642	0.133256	0.132643	0.13206	0.131645	0.131312	0.131107	0.13099	
0.181426	0.182241	0.182879	0.183389	0.183885	0.18449	0.185293	0.186203	0.186965	0.187422	0.187231	0.186354	0.184799	0.182831	0.180959	0.179588	0.178977	0.178989	0.179597	0.180488	
0.209268	0.209862	0.208838	0.206626	0.203755	0.200645	0.197605	0.194867	0.192527	0.190629	0.188908	0.18743	0.186274	0.185737	0.186292	0.188398	0.192229	0.197314	0.202681	0.206851	
0.165717	0.1645	0.16118	0.156239	0.150215	0.143475	0.136535	0.129856	0.124173	0.119612	0.116795	0.115841	0.117039	0.120877	0.127558	0.136366	0.145795	0.154129	0.160581	0.164471	
0.056438	0.054094	0.04959	0.04346	0.036228	0.028441	0.020668	0.013418	0.007654	0.00306	0.000758	0.001221	0.004729	0.011326	0.020204	0.030127	0.039711	0.047471	0.053211	0.056213	
-0.08294	-0.08572	-0.0907	-0.09728	-0.10509	-0.11375	-0.12233	-0.131	-0.13645	-0.14024	-0.14128	-0.13822	-0.13309	-0.12547	-0.11628	-0.10652	-0.09736	-0.09031	-0.08515	-0.08267	
-0.23391	-0.23829	-0.24492	-0.25303	-0.26187	-0.27068	-0.27997	-0.28661	-0.2913	-0.29305	-0.2924	-0.28859	-0.28067	-0.27176	-0.26182	-0.25219	-0.24382	-0.23793	-0.23387	-0.23246	
-0.39761	-0.40264	-0.40949	-0.41752	-0.42604	-0.43439	-0.4419	-0.44792	-0.45184	-0.45271	-0.45118	-0.44668	-0.43956	-0.43057	-0.42083	-0.41146	-0.40394	-0.39816	-0.39506	-0.39495	
-0.56134	-0.56618	-0.5732	-0.58146	-0.59017	-0.59856	-0.60593	-0.6116	-0.61503	-0.61549	-0.61353	-0.60898	-0.60231	-0.5942	-0.58544	-0.57687	-0.56963	-0.56378	-0.56019	-0.5593	
-0.71065	-0.71437	-0.72057	-0.7285	-0.73718	-0.74564	-0.75305	-0.75874	-0.76221	-0.76292	-0.76145	-0.75766	-0.75193	-0.74481	-0.73692	-0.72895	-0.72188	-0.7158	-0.71158	-0.70974	
-0.82976	-0.83236	-0.83767	-0.84507	-0.85355	-0.86205	-0.86964	-0.87562	-0.87951	-0.88084	-0.88012	-0.8772	-0.87242	-0.86621	-0.85905	-0.85151	-0.84418	-0.83796	-0.83296	-0.83006	
-0.9032	-0.90533	-0.9094	-0.91613	-0.92543	-0.93411	-0.94208	-0.94857	-0.95285	-0.95519	-0.95533	-0.95341	-0.9497	-0.94452	-0.93722	-0.93021	-0.92187	-0.91517	-0.90931	-0.90507	
-0.91494	-0.9134	-0.91494	-0.91987	-0.92748	-0.93652	-0.94536	-0.95289	-0.95835	-0.96182	-0.96314	-0.96251	-0.96003	-0.95609	-0.951	-0.94488	-0.93813	-0.93111	-0.92455	-0.91891	
-0.83446	-0.83198	-0.8312	-0.83245	-0.83583	-0.84126	-0.84823	-0.85583	-0.86266	-0.86762	-0.87055	-0.87162	-0.87104	-0.86899	-0.86559	-0.86099	-0.85536	-0.8492	-0.84336	-0.83834	
-0.62763	-0.6268	-0.62606	-0.62544	-0.62512	-0.62535	-0.62601	-0.62703	-0.62837	-0.62978	-0.631	-0.63185	-0.63225	-0.63218	-0.63176	-0.63114	-0.63048	-0.62985	-0.62907	-0.62835	
-0.31692	-0.3159	-0.31542	-0.31548	-0.31601	-0.31684	-0.3178	-0.31876	-0.31966	-0.32049	-0.32126	-0.32195	-0.32253	-0.32294	-0.3231	-0.32292	-0.32233	-0.32129	-0.31988	-0.31833	
0.004056	0.000988	0.003615	0.000822	0.003198	0.000668	0.000614	0.000579	0.000568	0.000579	0.000612	0.000666	0.000737	0.00082	0.003701	0.000986	0.001051	0.001093	0.001108	0.004073	

Anexo 7 – Script de modelo simplificado 7

Script

```
load GM_values.mat

    Ensayo_12 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','A3:B2695');
    Ensayo_13 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','C3:D1905');
    Ensayo_14 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','E3:F1889');
    Ensayo_15 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','G3:H2401');
    Ensayo_19 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','I3:J2716');
    Ensayo_20 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','K3:L2222');
    Ensayo_21 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','M3:N1466');
    Ensayo_26 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','O3:P2938');
    Ensayo_27 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','Q3:R2038');
    Ensayo_28 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','S3:T2049');
    Ensayo_32 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','U3:V1620');
    Ensayo_33 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','W3:X2563');

    Ensayo_1 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','A3569:B6384');
    Ensayo_2 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','C3569:D4548');
    Ensayo_3 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','E3569:F4364');
    Ensayo_4 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','G3569:H4621');
    Ensayo_5 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','I3569:J10179')
;
    Ensayo_6 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','K3569:L8623');
```

```
    Ensayo_7 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','M3569:N6760');
    Ensayo_8 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','O3569:P7107');
    Ensayo_9 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','Q3569:R4491');
    Ensayo_10 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','S3569:T4405');
    Ensayo_11 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','U3569:V4413');
    Ensayo_16 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','W3569:X5676');
    Ensayo_17 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','Y3569:Z4167');
    Ensayo_18 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','AA3569:AB4432'
);
    Ensayo_22 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','AC3569:AD5660'
);
    Ensayo_23 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','AE3569:AF3994'
);
    Ensayo_24 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','AG3569:AH4149'
);
    Ensayo_25 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','AI3569:AJ5011'
);
    Ensayo_29 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','AK3569:AL5197'
);
    Ensayo_30 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','AM3569:AN4464'
);
    Ensayo_31 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','AO3569:AP5761'
);

Vbuque = 0;
Vw_e=[];
alfa_encuentro=180;
MATRIZ_AMP=[];
w_n = 0.941;
frec_ola=(0.4:0.01:2.4);
frec_ola_aux=(0.4:0.05:2.4);
%ratio = (0.5:0.05:2.5);
```

```

%w_e=ratio*w_n;
g=9.81;

%Gm0=0.35;

pendiente_ola=[1/200 1/100 1/50 1/30 1/20 1/15];
L=22;

VALORES_1=[];
VALORES_2=[];
VALORES_3=[];
VALORES_4=[];
VALORES_5=[];
VALORES_6=[];

MATRIZ_1=[];
MATRIZ_2=[];
MATRIZ_3=[];
MATRIZ_4=[];
MATRIZ_5=[];
MATRIZ_6=[];

[x,y] = meshgrid(frec_ola_aux,pendiente_ola);
[Xq,Yq] = meshgrid(frec_ola,pendiente_ola);

Mat_deltaGM_aux=interp2(x,y,deltaGM,Xq,Yq);
Mat_GM0_aux=interp2(x,y,GM0,Xq,Yq);

for j=1:length(pendiente_ola)

    MATRIZ_AMP=[];

    j;

    for i=1:length(frec_ola)

        % syms frec_ola
        % eq =
frec_ola==w_e(i)+((frec_ola^2)/g)*Vbuque*cos(alfa_encuentr
o);

        %solve (eq,frec_ola);
        w_e=frec_ola(i)-
(frec_ola(i)^2/g)*Vbuque*cos(alfa_encuentro);
        longitud_ola=2*pi*g/(frec_ola(i)^2);
        H_ola=pendiente_ola(j)*longitud_ola;

        deltaGM_aux= Mat_deltaGM_aux(j,i);

```

```

        GM0_aux= Mat_GM0_aux(j,i);

        [t,y]=ode45 (@(t, y)
Ecuacion_Resonancia_Parametrica(t,y,deltaGM_aux,w_e,GM0_aux), [0:0.05:500],[1*pi/180,0]);

        if j==1
            Vw_e=[Vw_e w_e];
        end

        MATRIZ_AMP=[MATRIZ_AMP y(:,1)];

    i;
end
%for s=1:length(MAXIMOS_1)
    % if MAXIMOS_1(s)<0.01
        % MAXIMOS_1(s)=0
    % end
%end

Vw_en = Vw_e/w_n;

t_ejemplo=t(8001:10001,:);
if j==1
    MATRIZ_1=MATRIZ_AMP;
    VALORES_1=MATRIZ_1(8001:10001,:);
    MAXIMOS_1=max(VALORES_1);
end
if j==2
    MATRIZ_2=MATRIZ_AMP;
    VALORES_2=MATRIZ_2(8001:10001,:);
    MAXIMOS_2=max(VALORES_2);
end
if j==3
    MATRIZ_3=MATRIZ_AMP;
    VALORES_3=MATRIZ_3(8001:10001,:);
    MAXIMOS_3=max(VALORES_3);
end
if j==4
    MATRIZ_4=MATRIZ_AMP;
    VALORES_4=MATRIZ_4(8001:10001,:);
    MAXIMOS_4=max(VALORES_4);
end
if j==5
    MATRIZ_5=MATRIZ_AMP;
    VALORES_5=MATRIZ_5(8001:10001,:);
    MAXIMOS_5=max(VALORES_5);

```

```

end
if j==6
MATRIZ_6=MATRIZ_AMP;
VALORES_6=MATRIZ_6(8001:10001,:);
MAXIMOS_6=max(VALORES_6);
end

```

```
end
```

```
save Resultados1.mat
```

Función

```

function
dydt=Ecuacion_Resonancia_Parametrica(t,y,deltaGM_aux,w_e,G
M0_aux)

desplazamiento=184.983;
w_n=0.941;
A44=637.10;
g=9.81;
B44a=6.8714;
B44b=516.2276;
Ixx=(g*desplazamiento*0.446/w_n^2)-A44;
C44=desplazamiento*g*(GM0_aux+deltaGM_aux*cos(w_e*t));
dydt=zeros(2,1);
dydt(1)=y(2);
dydt(2)=(-(C44*sin(y(1)))-
(B44a*y(2)+B44b*y(2)*abs(y(2))))/(Ixx+A44);

```

Anexo 8 – Script Visual Basic para obtención de brazos adrizantes 8

```
Sub RunLimitKGforTrimRange()
```

```
    hydromaxApp.Design.ActiveAnalysisMode = hmAMStability ' specify analysis mode
```

```
    hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveForm = hmWFSinusoidal
```

```
    Dim FrecuencyStart As Double
```

```
    Dim FrecuencyFinish As Double
```

```
    Dim FrecuencyInterval As Double
```

```
    Dim Slope1 As Double
```

```
    Dim Slope2 As Double
```

```
    Dim Slope3 As Double
```

```
    Dim Slope4 As Double
```

```
    Dim Slope5 As Double
```

```
    Dim Slope6 As Double
```

```
    Dim FrecuencyIterator As Long
```

```
    Dim Slopeliterator As Long
```

```
    Dim iterator1 As Long
```

```
    Dim iterator2 As Long
```

```
    Dim iterator3 As Long
```

```
    Dim WaveLenght As Double
```

```
    Dim Analysistext1 As String
```

```
    Dim Analysistext2 As String
```

```
    Dim Analysistext3 As String
```

```
    Dim GMResult As Double
```

```
    Dim rowOffset As Long
```

```
    Dim columnOffset As Long
```

```
    Dim WaveOffset As Double
```

```
    Dim Contador As Long
```

```
    FrecuencyStart = Range("info!b18") ' refers to cell B20 on sheet "info" where you  
specify start trim
```

```
    FrecuencyFinish = Range("info!b19")
```

```
    FrecuencyInterval = Range("info!b20")
```

```

Slope1 = Range("info!e18")
Slope2 = Range("info!e19")
Slope3 = Range("info!e20")
Slope4 = Range("info!e21")
Slope5 = Range("info!e22")
Slope6 = Range("info!e23")
Frecuencylterator = Range("info!g18")
Slopelterator = Range("info!g19")

```

'A partir de aqui sería la programación en si

```

For iterator1 = 1 To Slopelterator
    columnOffset = Contador

```

```

    For iterator2 = 1 To Frecuencylterator
        WaveLength = (2 * 3.141592 * 9.81 / (FrecuencyStart) ^ 2)
        WaveLength = Round(WaveLength, 3)
        Range("results!c1") = WaveLength

```

```

        hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveLength = WaveLength

```

```

        If iterator1 = 1 Then hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveHeight = Slope1 *
WaveLength

```

```

        If iterator1 = 2 Then hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveHeight = Slope2 *
WaveLength

```

```

        If iterator1 = 3 Then hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveHeight = Slope3 *
WaveLength

```

```

        If iterator1 = 4 Then hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveHeight = Slope4 *
WaveLength

```

```

        If iterator1 = 5 Then hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveHeight = Slope5 *
WaveLength

```

```

        If iterator1 = 6 Then hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveHeight = Slope6 *
WaveLength

```

```

        Range("results!d1") = hydromaxApp.Design.WaveForm.WaveHeight

```

```

    For iterator3 = 1 To 20

```

```
WaveOffset = iterator3 / 20  
hydromaxApp.Design.WaveForm.PhaseOffset = WaveOffset
```

```
hydromaxApp.Design.RunAnalysis
```

```
Analysistext1 = iterator1  
Analysistext2 = FrecuencyStart  
Analysistext3 = WaveOffset
```

```
Range("a3").Offset(rowOffset, columnOffset).Value = "Resultados para:  
Pendiente de ola = " + Analysistext1 + " frecuencia = " + Analysistext2 + " y offset = " +  
Analysistext3 + ""
```

```
rowOffset = rowOffset + 1
```

```
Range("a3").Offset(rowOffset, columnOffset).Value = "GZ"
```

```
rowOffset = rowOffset + 1
```

```
For Each result In hydromaxApp.Design.LargeAngleStabilityResults
```

```
Range("a3").Offset(rowOffset, columnOffset).Value = result.GZ
```

```
rowOffset = rowOffset + 1
```

```
Next
```

```
columnOffset = columnOffset + 1
```

```
rowOffset = rowOffset - 24
```

```
Next
```

```
rowOffset = rowOffset + 25
```

```
columnOffset = Contador
```

```
FrecuencyStart = FrecuencyStart + FrecuencyInterval
```

```
Next
```

```
FrecuencyStart = Range("info!b18")
```

```
Contador = Contador + 24
```

```
rowOffset = 0
```

```
Next
```

```
End Sub
```


Anexo 9 – Script modelo no lineal 9

Script

```
load GM_values.mat

    Ensayo_12 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','A3:B2695');
    Ensayo_13 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','C3:D1905');
    Ensayo_14 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','E3:F1889');
    Ensayo_15 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','G3:H2401');
    Ensayo_19 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','I3:J2716');
    Ensayo_20 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','K3:L2222');
    Ensayo_21 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','M3:N1466');
    Ensayo_26 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','O3:P2938');
    Ensayo_27 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','Q3:R2038');
    Ensayo_28 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','S3:T2049');
    Ensayo_32 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','U3:V1620');
    Ensayo_33 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','W3:X2563');

    Ensayo_1 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','A3569:B6384');
    Ensayo_2 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','C3569:D4548');
    Ensayo_3 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','E3569:F4364');
    Ensayo_4 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','G3569:H4621');
    Ensayo_5 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','I3569:J10179')
;
    Ensayo_6 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','K3569:L8623');
```

```
    Ensayo_7 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','M3569:N6760');
    Ensayo_8 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','O3569:P7107');
    Ensayo_9 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','Q3569:R4491');
    Ensayo_10 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','S3569:T4405');
    Ensayo_11 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','U3569:V4413');
    Ensayo_16 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','W3569:X5676');
    Ensayo_17 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','Y3569:Z4167');
    Ensayo_18 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','AA3569:AB4432'
);
    Ensayo_22 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','AC3569:AD5660'
);
    Ensayo_23 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','AE3569:AF3994'
);
    Ensayo_24 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','AG3569:AH4149'
);
    Ensayo_25 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','AI3569:AJ5011'
);
    Ensayo_29 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','AK3569:AL5197'
);
    Ensayo_30 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','AM3569:AN4464'
);
    Ensayo_31 =
xlsread('Todos_los_ensayos.xlsx','Ensayos','AO3569:AP5761'
);

load Matriz1.mat
load Matriz2.mat
load Matriz3.mat
load Matriz4.mat
load Matriz5.mat
load Matriz6.mat

Mat_GZ{1} = Matriz1;
```

```

Mat_GZ{2} = Matriz2;
Mat_GZ{3} = Matriz3;
Mat_GZ{4} = Matriz4;
Mat_GZ{5} = Matriz5;
Mat_GZ{6} = Matriz6;

Vbuque = 0;
Vw_e=[];
alfa_encuentro=180;
MATRIZ_AMP=[];
w_n = 0.941;
frec_ola=(0.4:0.01:2.4);
frec_ola_aux=(0.4:0.05:2.4);
%ratio = (0.5:0.05:2.5);
%w_e=ratio*w_n;
g=9.81;

%Gm0=0.35;

pendiente_ola=[1/200 1/100 1/50 1/30 1/20 1/15];
L=22;

VALORES_1=[];
VALORES_2=[];
VALORES_3=[];
VALORES_4=[];
VALORES_5=[];
VALORES_6=[];

MATRIZ_1=[];
MATRIZ_2=[];
MATRIZ_3=[];
MATRIZ_4=[];
MATRIZ_5=[];
MATRIZ_6=[];

[x y] = meshgrid(frec_ola_aux,pendiente_ola);
[Xq Yq] = meshgrid(frec_ola,pendiente_ola);

Mat_deltaGM_aux=interp2(x,y,deltaGM,Xq,Yq);
Mat_GM0_aux=interp2(x,y,GM0,Xq,Yq);

for j=1:length(pendiente_ola)

    MATRIZ_AMP=[];

```

```

j
    for i=1:length(frec_ola)

        % syms frec_ola
        % eq =
frec_ola==w_e(i)+((frec_ola^2)/g)*Vbuque*cos(alfa_encuentr
o);
        %solve (eq,frec_ola);
        w_e=frec_ola(i)-
(frec_ola(i)^2/g)*Vbuque*cos(alfa_encuentro);
        longitud_ola=2*pi*g/(frec_ola(i)^2);
        H_ola=pendiente_ola(j)*longitud_ola;

        Matriz= Mat_GZ{j};
        GZ = Matriz(:, :, i);

        [t,y]=ode45 (@(t, y)
Ecuacion_Resonancia_Parametrica2(t,y,GZ,w_e),
[0:0.05:500],[1*pi/180,0]);

        if j==1
            Vw_e=[Vw_e w_e];
        end

        MATRIZ_AMP=[MATRIZ_AMP y(:,1)];

    end
end
%for s=1:length(MAXIMOS_1)
    % if MAXIMOS_1(s)<0.01
        % MAXIMOS_1(s)=0
    % end
%end

Vw_en = Vw_e/w_n;
t_ejemplo=t(8001:10001,:);
if j==1
    MATRIZ_1=MATRIZ_AMP;
    VALORES_1=MATRIZ_1(8001:10001,:);
    MAXIMOS_1=max(VALORES_1);
end
if j==2
    MATRIZ_2=MATRIZ_AMP;
    VALORES_2=MATRIZ_2(8001:10001,:);
    MAXIMOS_2=max(VALORES_2);
end
end

```

```

    if j==3
    MATRIZ_3=MATRIZ_AMP;
    VALORES_3=MATRIZ_3(8001:10001,:);
    MAXIMOS_3=max(VALORES_3);
    end
    if j==4
    MATRIZ_4=MATRIZ_AMP;
    VALORES_4=MATRIZ_4(8001:10001,:);
    MAXIMOS_4=max(VALORES_4);
    end
    if j==5
    MATRIZ_5=MATRIZ_AMP;
    VALORES_5=MATRIZ_5(8001:10001,:);
    MAXIMOS_5=max(VALORES_5);
    end
    if j==6
    MATRIZ_6=MATRIZ_AMP;
    VALORES_6=MATRIZ_6(8001:10001,:);
    MAXIMOS_6=max(VALORES_6);
    end

```

```
end
```

```
save Resultados2.mat
```

Función

```

function
dydt=Ecuacion_Resonancia_Parametrica2(t,y,GZ_mat,w_e)

desplazamiento=184.983;
w_n=0.941;
A44=637.10;
g=9.81;
B44a=6.8714;
B44b=516.2276;

Te = 2*pi/w_e;

vector_position =(0:0.01:1);
vector_angulo = (0:1:180);

position =mod(t/Te,1);

```

```
GZ_interp =  
interp2(vector_position,vector_angulo,GZ_mat,position,abs(  
y(1))*180/pi);  
  
C44 = sign(y(1))*desplazamiento*g*GZ_interp;  
  
Ixx=(g*desplazamiento*0.446/w_n^2)-A44;  
%C44=desplazamiento*g*(GM0_aux+deltaGM_aux*cos(w_e*t));  
dydt=zeros(2,1);  
dydt(1)=y(2);  
dydt(2)=(-(C44)-  
(B44a*y(2)+B44b*y(2)*abs(y(2))))/(Ixx+A44);
```

Anexo 10 – Generación de matrices GZ para introducir en el script no lineal 10

```
load 'Slope1.mat'  
load 'Slope2.mat'  
load 'Slope3.mat'  
load 'Slope4.mat'  
load 'Slope5.mat'  
load 'Slope6.mat'  
  
NuevoSlope1=[];  
NuevoSlope2=[];  
NuevoSlope3=[];  
NuevoSlope4=[];  
NuevoSlope5=[];  
NuevoSlope6=[];  
intervalo = 0;  
contador = (1:1:902/22);  
  
for contador=1:length(contador)  
  
    NuevoSlope1(1:22, :, contador) =  
    Slope1(1+intervalo:22+intervalo, :);  
  
    intervalo=intervalo+22;  
  
    contador  
  
end  
intervalo = 0;  
contador = (1:1:902/22);  
for contador=1:length(contador)  
  
    NuevoSlope2(1:22, :, contador) =  
    Slope2(1+intervalo:22+intervalo, :);  
  
    intervalo=intervalo+22;  
  
    contador  
  
end  
intervalo = 0;
```

```
contador = (1:1:902/22);  
for contador=1:length(contador)  
  
    NuevoSlope3(1:22, :, contador) =  
    Slope3(1+intervalo:22+intervalo, :);  
  
    intervalo=intervalo+22;  
  
    contador
```

```
end  
intervalo = 0;  
contador = (1:1:902/22);  
for contador=1:length(contador)  
  
    NuevoSlope4(1:22, :, contador) =  
    Slope4(1+intervalo:22+intervalo, :);  
  
    intervalo=intervalo+22;  
  
    contador
```

```
end  
intervalo = 0;  
contador = (1:1:902/22);  
for contador=1:length(contador)  
  
    NuevoSlope5(1:22, :, contador) =  
    Slope5(1+intervalo:22+intervalo, :);  
  
    intervalo=intervalo+22;  
  
    contador
```

```
end  
intervalo = 0;  
contador = (1:1:902/22);  
  
for contador=1:length(contador)
```



```

    NuevoSlope6(1:22, :, contador) =
    Slope6(1+intervalo:22+intervalo, :);

    intervalo=intervalo+22;

    contador

end
save 'NuevoSlope1.mat'
save 'NuevoSlope2.mat'
save 'NuevoSlope3.mat'
save 'NuevoSlope4.mat'
save 'NuevoSlope5.mat'
save 'NuevoSlope6.mat'

load 'NuevoSlope1.mat'
load 'NuevoSlope2.mat'
load 'NuevoSlope3.mat'
load 'NuevoSlope4.mat'
load 'NuevoSlope5.mat'
load 'NuevoSlope6.mat'

NS1 = [];
NS2 = [];
NS3 = [];
NS4 = [];
NS5 = [];
NS6 = [];

NuevoSlope1 = NuevoSlope1(4:22, :, :);
NuevoSlope2 = NuevoSlope2(4:22, :, :);
NuevoSlope3 = NuevoSlope3(4:22, :, :);
NuevoSlope4 = NuevoSlope4(4:22, :, :);
NuevoSlope5 = NuevoSlope5(4:22, :, :);
NuevoSlope6 = NuevoSlope6(4:22, :, :);

contador=(1:1:21);
contador2=[20 1:1:20];
for contador=1 : length(contador)

NS1 (:, contador, :) = NuevoSlope1 (:, contador2(contador), :);

end
contador=(1:1:21);
contador2=[20 1:1:20];
for contador=1 : length(contador)

```

```
NS2 (:,contador,:) = NuevoSlope2 (:,contador2(contador),:);

end
contador=(1:1:21);
contador2=[20 1:1:20];
for contador=1 : length(contador)

NS3 (:,contador,:) = NuevoSlope3 (:,contador2(contador),:);

end
contador=(1:1:21);
contador2=[20 1:1:20];
for contador=1 : length(contador)

NS4 (:,contador,:) = NuevoSlope4 (:,contador2(contador),:);

end
contador=(1:1:21);
contador2=[20 1:1:20];
for contador=1 : length(contador)

NS5 (:,contador,:) = NuevoSlope5 (:,contador2(contador),:);

end
contador=(1:1:21);
contador2=[20 1:1:20];
for contador=1 : length(contador)

NS6 (:,contador,:) = NuevoSlope6 (:,contador2(contador),:);

end

save 'NS1.mat'
save 'NS2.mat'
save 'NS3.mat'
save 'NS4.mat'
save 'NS5.mat'
save 'NS6.mat'

load NS1.mat
load NS2.mat
load NS3.mat
load NS4.mat
load NS5.mat
load NS6.mat

posiciones = (0:0.05:1);
```

```
angulos = (0:10:180);
frecuencias = (0.4:0.05:2.4);

[x,y,z] = meshgrid(posiciones,angulos,frecuencias);

posicionesN = (0:0.01:1);
angulosN = (0:1:180);
frecuenciasN = (0.4:0.01:2.4);

[Xq,Yq,Zq] = meshgrid(posicionesN,angulosN,frecuenciasN);

contador=(1:1:6);

for contador=1 : length (contador)

    if contador==1
        Matriz1 = interp3(x,y,z,NS1,Xq,Yq,Zq);
    end
    if contador==2
        Matriz2 = interp3(x,y,z,NS2,Xq,Yq,Zq);
    end
    if contador==3
        Matriz3 = interp3(x,y,z,NS3,Xq,Yq,Zq);
    end
    if contador==4
        Matriz4 = interp3(x,y,z,NS4,Xq,Yq,Zq);
    end
    if contador==5
        Matriz5 = interp3(x,y,z,NS5,Xq,Yq,Zq);
    end
    if contador==6
        Matriz6 = interp3(x,y,z,NS6,Xq,Yq,Zq);
    end

end

save Matriz1.mat
save Matriz2.mat
save Matriz3.mat
save Matriz4.mat
save Matriz5.mat
save Matriz6.mat
```

Anexo 11 – Comparación de resultados 11

```
load Resultados1.mat/ load Resultados2.mat
```

```
MATRIZ_1=MATRIZ_1*180/pi;  
MATRIZ_2=MATRIZ_2*180/pi;  
MATRIZ_3=MATRIZ_3*180/pi;  
MATRIZ_4=MATRIZ_4*180/pi;  
MATRIZ_5=MATRIZ_5*180/pi;  
MATRIZ_6=MATRIZ_6*180/pi;  
  
MAXIMOS_1=MAXIMOS_1*180/pi;  
MAXIMOS_2=MAXIMOS_2*180/pi;  
MAXIMOS_3=MAXIMOS_3*180/pi;  
MAXIMOS_4=MAXIMOS_4*180/pi;  
MAXIMOS_5=MAXIMOS_5*180/pi;  
MAXIMOS_6=MAXIMOS_6*180/pi;  
  
Ensayo_1(isnan(Ensayo_1))=0;  
Ensayo_2(isnan(Ensayo_2))=0;  
Ensayo_3(isnan(Ensayo_3))=0;  
Ensayo_4(isnan(Ensayo_4))=0;  
Ensayo_5(isnan(Ensayo_5))=0;  
Ensayo_6(isnan(Ensayo_6))=0;  
Ensayo_7(isnan(Ensayo_7))=0;  
Ensayo_8(isnan(Ensayo_8))=0;  
Ensayo_9(isnan(Ensayo_9))=0;  
Ensayo_10(isnan(Ensayo_10))=0;  
Ensayo_11(isnan(Ensayo_11))=0;  
Ensayo_12(isnan(Ensayo_12))=0;  
Ensayo_13(isnan(Ensayo_13))=0;  
Ensayo_14(isnan(Ensayo_14))=0;  
Ensayo_15(isnan(Ensayo_15))=0;  
Ensayo_16(isnan(Ensayo_16))=0;  
Ensayo_17(isnan(Ensayo_17))=0;  
Ensayo_18(isnan(Ensayo_18))=0;  
Ensayo_19(isnan(Ensayo_19))=0;  
Ensayo_20(isnan(Ensayo_20))=0;  
Ensayo_21(isnan(Ensayo_21))=0;  
Ensayo_22(isnan(Ensayo_22))=0;  
Ensayo_23(isnan(Ensayo_23))=0;  
Ensayo_24(isnan(Ensayo_24))=0;  
Ensayo_25(isnan(Ensayo_25))=0;  
Ensayo_26(isnan(Ensayo_26))=0;  
Ensayo_27(isnan(Ensayo_27))=0;  
Ensayo_28(isnan(Ensayo_28))=0;
```

```
Ensayo_29(isnan(Ensayo_29))=0;
Ensayo_30(isnan(Ensayo_30))=0;
Ensayo_31(isnan(Ensayo_31))=0;
Ensayo_32(isnan(Ensayo_32))=0;
Ensayo_33(isnan(Ensayo_33))=0;

Intervalot_1 = Ensayo_1(:,1)';
Intervalot_2 = Ensayo_2(:,1)';
Intervalot_3 = Ensayo_3(:,1)';
Intervalot_4 = Ensayo_4(:,1)';
Intervalot_5 = Ensayo_5(:,1)';
Intervalot_6 = Ensayo_6(:,1)';
Intervalot_7 = Ensayo_7(:,1)';
Intervalot_8 = Ensayo_8(:,1)';
Intervalot_9 = Ensayo_9(:,1)';
Intervalot_10 = Ensayo_10(:,1)';
Intervalot_11 = Ensayo_11(:,1)';
Intervalot_16 = Ensayo_16(:,1)';
Intervalot_17 = Ensayo_17(:,1)';
Intervalot_18 = Ensayo_18(:,1)';
Intervalot_22 = Ensayo_22(:,1)';
Intervalot_23 = Ensayo_23(:,1)';
Intervalot_24 = Ensayo_24(:,1)';
Intervalot_25 = Ensayo_25(:,1)';
Intervalot_29 = Ensayo_29(:,1)';
Intervalot_30 = Ensayo_30(:,1)';
Intervalot_31 = Ensayo_31(:,1)';

Intervalot_12 = Ensayo_12(:,1)';
Intervalot_13 = Ensayo_13(:,1)';
Intervalot_14 = Ensayo_14(:,1)';
Intervalot_15 = Ensayo_15(:,1)';
Intervalot_19 = Ensayo_19(:,1)';
Intervalot_20 = Ensayo_20(:,1)';
Intervalot_21 = Ensayo_21(:,1)';
Intervalot_26 = Ensayo_26(:,1)';
Intervalot_27 = Ensayo_27(:,1)';
Intervalot_28 = Ensayo_28(:,1)';
Intervalot_32 = Ensayo_32(:,1)';
Intervalot_33 = Ensayo_33(:,1)';

Nuevointervalot = (0:0.05:275.75);

Paso = [1 2]';
```

```
Ensayo_1=interp2(Paso,Intervalot_1,Ensayo_1,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe1 = max(Ensayo_1(:,2));
```

```
Ensayo_2=interp2(Paso,Intervalot_2,Ensayo_2,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe2 = max(Ensayo_2(:,2));
```

```
Ensayo_3=interp2(Paso,Intervalot_3,Ensayo_3,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe3 = max(Ensayo_3(:,2));
```

```
Ensayo_4=interp2(Paso,Intervalot_4,Ensayo_4,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe4 = max(Ensayo_4(:,2));
```

```
Ensayo_5=interp2(Paso,Intervalot_5,Ensayo_5,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe5 = max(Ensayo_5(:,2));
```

```
Ensayo_6=interp2(Paso,Intervalot_6,Ensayo_6,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe6 = max(Ensayo_6(:,2));
```

```
Ensayo_7=interp2(Paso,Intervalot_7,Ensayo_7,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe7 = max(Ensayo_7(:,2));
```

```
Ensayo_8=interp2(Paso,Intervalot_8,Ensayo_8,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe8 = max(Ensayo_8(:,2));
```

```
Ensayo_9=interp2(Paso,Intervalot_9,Ensayo_9,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe9 = max(Ensayo_9(:,2));
```

```
Ensayo_10=interp2(Paso,Intervalot_10,Ensayo_10,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe10 = max(Ensayo_10(:,2));
```

```
Ensayo_11=interp2(Paso,Intervalot_11,Ensayo_11,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe11 = max(Ensayo_11(:,2));
```

```
Ensayo_16=interp2(Paso,Intervalot_16,Ensayo_16,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe16 = max(Ensayo_16(:,2));

Ensayo_17=interp2(Paso,Intervalot_17,Ensayo_17,Paso,Nuevointervalot);
Maximoe17 = max(Ensayo_17(:,2));

Ensayo_18=interp2(Paso,Intervalot_18,Ensayo_18,Paso,Nuevointervalot);
Maximoe18 = max(Ensayo_18(:,2));

Ensayo_22=interp2(Paso,Intervalot_22,Ensayo_22,Paso,Nuevointervalot);
Maximoe22 = max(Ensayo_22(:,2));

Ensayo_23=interp2(Paso,Intervalot_23,Ensayo_23,Paso,Nuevointervalot);
Maximoe23 = max(Ensayo_23(:,2));

Ensayo_24=interp2(Paso,Intervalot_24,Ensayo_24,Paso,Nuevointervalot);
Maximoe24 = max(Ensayo_24(:,2));

Ensayo_25=interp2(Paso,Intervalot_25,Ensayo_25,Paso,Nuevointervalot);
Maximoe25 = max(Ensayo_25(:,2));

Ensayo_29=interp2(Paso,Intervalot_29,Ensayo_29,Paso,Nuevointervalot);
Maximoe29 = max(Ensayo_29(:,2));

Ensayo_30=interp2(Paso,Intervalot_30,Ensayo_30,Paso,Nuevointervalot);
Maximoe30 = max(Ensayo_30(:,2));

Ensayo_31=interp2(Paso,Intervalot_31,Ensayo_31,Paso,Nuevointervalot);
Maximoe31 = max(Ensayo_31(:,2));

Ensayo_12=interp2(Paso,Intervalot_12,Ensayo_12,Paso,Nuevointervalot);
Maximoe12 = max(Ensayo_12(:,2));

Ensayo_13=interp2(Paso,Intervalot_13,Ensayo_13,Paso,Nuevointervalot);
Maximoe13 = max(Ensayo_13(:,2));
```

```
Ensayo_14=interp2(Paso,Intervalot_14,Ensayo_14,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe14 = max(Ensayo_14(:,2));
```

```
Ensayo_15=interp2(Paso,Intervalot_15,Ensayo_15,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe15 = max(Ensayo_15(:,2));
```

```
Ensayo_19=interp2(Paso,Intervalot_19,Ensayo_19,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe19 = max(Ensayo_19(:,2));
```

```
Ensayo_20=interp2(Paso,Intervalot_20,Ensayo_20,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe20 = max(Ensayo_20(:,2));
```

```
Ensayo_21=interp2(Paso,Intervalot_21,Ensayo_21,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe21 = max(Ensayo_21(:,2));
```

```
Ensayo_26=interp2(Paso,Intervalot_26,Ensayo_26,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe26 = max(Ensayo_26(:,2));
```

```
Ensayo_27=interp2(Paso,Intervalot_27,Ensayo_27,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe27 = max(Ensayo_27(:,2));
```

```
Ensayo_28=interp2(Paso,Intervalot_28,Ensayo_28,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe28 = max(Ensayo_28(:,2));
```

```
Ensayo_32=interp2(Paso,Intervalot_32,Ensayo_32,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe32 = max(Ensayo_32(:,2));
```

```
Ensayo_33=interp2(Paso,Intervalot_33,Ensayo_33,Paso,Nuevointervalot);
```

```
Maximoe33 = max(Ensayo_33(:,2));
```

```
Maximopendiente50_1 = [1.65 0; 1.7 Maximoe1; 1.81 Maximoe2; 1.92 Maximoe3; 1.96 Maximoe4; 1.98 Maximoe5; 2 Maximoe6; 2.02 Maximoe7; 2.05 Maximoe30; 2.1 Maximoe31; 2.15 0];
```



```
Maximopendiente30_1 = [1.65 0; 1.7 Maximo8; 1.81
Maximo9; 1.92 Maximo10; 1.94 Maximo11; 1.98 Maximo12;
2 Maximo14; 2.05 Maximo15; 2.1 0];
Maximopendiente20_1 = [1.85 0; 1.9 Maximo17; 1.95
Maximo18; 2 Maximo19; 2.05 Maximo20; 2.1 Maximo21;
2.15 Maximo22; 2.2 0];
Maximopendiente15_1 = [1.75 0; 1.8 Maximo23; 1.9
Maximo24; 1.95 Maximo25; 2 Maximo33; 2.05 Maximo27;
2.1 Maximo32; 2.15 Maximo29; 2.2 0];
Intervalofrecuencia = (0.4:0.01:2.4);

Maximopendiente50 =
interp2(Paso,Maximopendiente50_1(:,1),Maximopendiente50_1,
Paso,Intervalofrecuencia);
Maximopendiente30 =
interp2(Paso,Maximopendiente30_1(:,1),Maximopendiente30_1,
Paso,Intervalofrecuencia);
Maximopendiente20 =
interp2(Paso,Maximopendiente20_1(:,1),Maximopendiente20_1,
Paso,Intervalofrecuencia);
Maximopendiente15 =
interp2(Paso,Maximopendiente15_1(:,1),Maximopendiente15_1,
Paso,Intervalofrecuencia);

Maximopendiente50(isnan(Maximopendiente50))=0;
Maximopendiente30(isnan(Maximopendiente30))=0;
Maximopendiente20(isnan(Maximopendiente20))=0;
Maximopendiente15(isnan(Maximopendiente15))=0;
```