

# **Análisis numérico y experimental de la resonancia paramétrica en buques de pesca**

Marcos Míguez González <sup>1)</sup> Vicente Díaz Casás <sup>1)</sup>  
Fernando López Peña <sup>1)</sup> Luis Pérez Rojas <sup>2)</sup>

1) *Grupo Integrado de Ingeniería, Universidade da Coruña*  
[mmiguez@udc.es](mailto:mmiguez@udc.es) , [vdiaz@udc.es](mailto:vdiaz@udc.es) , [flop@udc.es](mailto:flop@udc.es)

2) *Canal de Ensayos Hidrodinámicos, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales*  
*Universidad Politécnica de Madrid*  
[luis.perezrojas@upm.es](mailto:luis.perezrojas@upm.es)

## Resumen

La resonancia paramétrica es una inestabilidad dinámica del balance del buque que puede afectar, entre otros, a los buques de pesca. Este fenómeno es debido a la variación de los brazos adrizantes con el paso de las olas y que bajo una serie de condiciones y especialmente en mares de proa, puede generar movimientos de balance de muy elevada amplitud. En el caso de los buques de pesca, la aparición de este fenómeno puede derivar en un serio riesgo para el buque y su tripulación.

En este trabajo se presenta un análisis numérico (a través de un modelo no lineal del balance) y experimental (a través de ensayos en canal con un modelo a escala), de la resonancia paramétrica de un buque arrastrero de tamaño medio, típico de la flota española, con el objetivo principal de evaluar la influencia de las condiciones de navegación en el desarrollo del fenómeno de resonancia y el nivel de riesgo del buque bajo dichas circunstancias.

## Abstract

Parametric roll resonance is a dynamic instability of ships that may affect fishing vessels among other types of vessels. It is produced by the modification of restoring arms due to wave travel along the hull. Under a given set of conditions, it could generate very large amplitude roll motions, especially in head seas. In the case of fishing vessels, parametric roll could imply a very severe risk for the ship and its crew.

In this work, both a numerical (by using a non linear roll mathematical model) and an experimental analysis (by carrying out scale model testing) of parametric roll resonance of a mid-size trawler are presented. The main objective of these analyses is to evaluate both the influence of the ship sailing conditions on the development of parametric roll and the risk level of the ship under such circumstances.

## Índice

- Introducción
- Buque Analizado
- Ensayos Experimentales
- Modelo Numérico
- Conclusiones y Trabajo Futuro
- Referencias

## ***Introducción***

El balance paramétrico autoexcitado, más conocido como resonancia paramétrica, puede definirse como una inestabilidad dinámica del balance del buque. Es debido a la variación de las fuerzas restauradoras transversales con el paso de la ola a lo largo del mismo y de los efectos del acoplamiento entre los movimientos de balance, cabeceo y arfada. Sus efectos son más acusados en mares longitudinales, de proa o popa, cuando la altura de ola supera un valor mínimo y cuando la frecuencia de encuentro entre buque y olas es aproximadamente el doble de la frecuencia natural de balance del mismo.

Bajo estas condiciones, la amplitud del balance puede incrementarse súbitamente hasta escoras muy elevadas, y que en los peores casos podrían llegar a provocar el vuelco del buque. La intensidad del fenómeno depende además de otros factores, tales como las formas del buque o la altura y frecuencia del oleaje, pero en todo caso las consecuencias de uno de estos episodios pueden llegar a ser muy graves.

Los buques más afectados por este tipo de inestabilidad son los portacontenedores, car carriers y cruceros de pasaje, pero también los buques de pesca [1]. Hasta la fecha, el estudio de la resonancia paramétrica ha estado centrado en los tres primeros tipos, debido al gran incremento de dichas flotas en la última mitad del siglo XX, a la importancia económica de las mismas y a una serie de accidentes que, debidos al fenómeno de resonancia, afectaron a estos tipos de buques con graves consecuencias, tanto materiales como personales.

Pero el caso de los buques de pesca es diferente. A pesar de que en un principio se consideraban los únicos que podían verse afectados por la resonancia paramétrica y posiblemente debido a la falta de evidencia de algún accidente debido al fenómeno y a su menor importancia económica, son actualmente mucho menos analizados que los casos anteriormente descritos. No obstante, diversos estudios han demostrado la susceptibilidad de los buques de pesca al fenómeno de resonancia paramétrica [2,3]. Teniendo en cuenta además los reducidos niveles de estabilidad que suelen presentar, las consecuencias de uno de estos eventos podría resultar catastrófica para el buque y su tripulación.

La necesidad de evitar las situaciones de riesgo que implica la aparición de resonancia paramétrica, así como otro tipo de inestabilidades dinámicas, tales como el planeo y pérdida de gobierno en olas de popa (surf riding y broaching) o la pérdida de estabilidad, ha sido claramente establecida por el sector, tanto desde el punto de vista normativo [4] como operativo, y diversos sistemas embarcados implementan algoritmos de prevención y de detección (estos últimos en fase de pruebas) [5,6]. En todo caso, son sistemas de una operación compleja, al estar enfocados a su utilización en buques de gran tamaño operados por tripulaciones de elevada formación.

La casuística especial de los buques de pesca, con tripulaciones poco formadas, hace muy difícil la implantación de tales sistemas en este tipo de buques, ya que su utilización y comprensión por parte de los patrones de los buques de pequeño y mediano porte resultaría compleja. Esta problemática llevó a los autores a plantear un sistema simplificado de ayuda a los patrones de buques de pesca, en que en un principio se evaluaba simplemente la estabilidad estática del buque, pero en donde se definía la necesidad de implementar también criterios dinámicos [7]. Y el trabajo presentado representa un avance en esta dirección.

El objetivo de este trabajo es diseñar e implementar un modelo matemático del comportamiento del buque que permita evaluar, en cada situación de navegación, el posible riesgo de aparición de resonancia paramétrica, y que sea adecuado para su utilización en un sistema embarcado simplificado de ayuda al patrón para buques de pesca, comprensible y de fácil utilización.

Dicho modelo, consistente en un sistema no lineal de un grado de libertad, en que además del balance, se incluyen de un modo cuasi estático el cabeceo y la arfada, se presenta en este trabajo. Con el objetivo de validar su funcionamiento frente a datos lo más realistas posibles, se ha realizado una campaña de ensayos en el canal de experiencias hidrodinámicas de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de Madrid. Dichos ensayos han proporcionado la información necesaria para realizar esta validación, pero al mismo tiempo ofrecen también una aproximación realista al comportamiento de un buque tipo de la flota española en condiciones favorables para la aparición del fenómeno de resonancia paramétrica.

Tal y como se describe en este trabajo, los resultados obtenidos han sido muy positivos en lo que se refiere a la obtención de las áreas de inestabilidad del buque, en que se muestran aquellas combinaciones de parámetros de navegación propicias a la aparición de resonancia paramétrica. Asimismo, a partir de los ensayos experimentales se ha demostrado la alta tendencia del tipo de buque analizado a sufrir el fenómeno, incluso en condiciones de navegación muy poco severas, justificando así la necesidad del sistema en desarrollo.

### ***Buque Analizado***

En este caso, el buque objeto de estudio es un arrastrero por popa, representativo de la flota Española de Gran Sol y también de parte de la flota de arrastre de litoral. Tiene la disposición típica de este tipo de buques, con dos cubiertas, el puente de gobierno situado a proa, inmediatamente a popa del castillo y con la cubierta de trabajo ocupando la mitad posterior del buque.

Son buques de tamaño medio, con formas llenas en la zona media para maximizar la capacidad de bodega, proas más finas y acampanadas y popas colgantes, próximas a la flotación. Este tipo de formas, al igual que sucede con los buques portacontenedores, son propensas a sufrir los efectos de la resonancia paramétrica, como puede observarse en [2], en que ensayos en canal de este mismo buque muestran su tendencia a sufrir el fenómeno.

Las principales características, plano de formas y demás datos del buque utilizados en este trabajo, se indican en la figura siguiente:

Eslora total	34.50 m
Eslora entre perpendiculares	29.00 m
Manga	8.00 m
Puntal cubierta superior	5.80 m
Puntal cubierta principal	3.65 m
Calado	3.290 m
Desplazamiento	448.0 t
GMt	0.350 m
KMt	4.131 m
Frecuencia natural balance ( $\omega_n$ )	0.563 rad/s
Radio de giro transversal	3.128 m
Radio de giro longitudinal	9.112 m

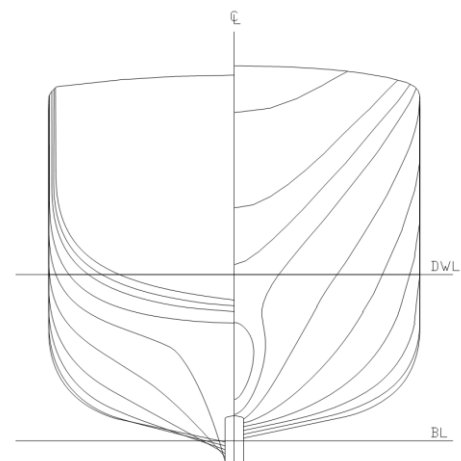


Figura 1: Características y plano de formas del buque de prueba.

## *Ensayos Experimentales*

Con el objetivo de conocer el comportamiento dinámico del buque en condiciones de resonancia, y de obtener datos del movimiento del mismo que permitan la validación del modelo matemático que se presentará posteriormente, se ha realizado en el canal de experiencias de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de Madrid, una completa campaña de ensayos experimentales.

Esta campaña consistió en el ensayo del comportamiento del buque en olas regulares de proa con diferentes valores de amplitud, frecuencia y longitud de onda. De este modo, puede conocerse qué combinaciones de estos parámetros son más peligrosas para el buque y en cuáles el fenómeno de resonancia es más intenso.

El modelo a escala seleccionado es una maqueta convencional, construida en madera y equipada con pesos variables para el ajuste de la distribución de masas deseada. La sensorización del mismo ha consistido en tres acelerómetros, dispuestos en proa, en popa y en la zona central del buque, que obtienen los datos referidos a ángulos de balance y cabeceo y aceleraciones vertical y transversal en las tres localizaciones. Asimismo, se dispone de una probeta de olas para obtener los valores de la altura de ola incidente en el modelo. Con el fin de permitir en la mayor medida posible el movimiento en los grados de libertad implicados en el desarrollo de la resonancia, el modelo es únicamente arrastrado por el carro a través de dos cabos sujetos a la roda mediante un elemento giratorio. La disposición del mismo puede observarse en la siguiente figura:



Figura 2: Disposición del modelo durante los ensayos en canal de experiencias.

En el caso que se presenta, se han realizado un total de 68 ensayos para cuatro velocidades diferentes; de ellos, 24 casos se corresponden con un número de Froude  $F_n = 0$ , 16 para  $F_n = 0.1$ , 15 para  $F_n = 0.2$  y 13 para  $F_n = 0.3$ . La altura de ola se ha variado entre un mínimo de 0.5 m y un máximo de 3.0 m y el ratio de frecuencias (frecuencia de encuentro entre frecuencia natural de balance del buque) entre un mínimo de 1.7 y un máximo de 2.3.

A partir de estos ensayos, se obtuvieron los denominados diagramas de estabilidad del buque. En ellos se representa, en función de la altura de la ola y el ratio de frecuencias, la aparición o no de resonancia y son, además, un indicador del nivel de riesgo de cada condición de navegación.

En las Figuras 3 a 6, pueden observarse los diagramas obtenidos para los ensayos correspondientes a los cuatro valores de velocidad analizados. En ellos, los puntos rojos indican aquellas combinaciones en que efectivamente se produce resonancia, mientras que los puntos azules indican aquellas en que no se produce.

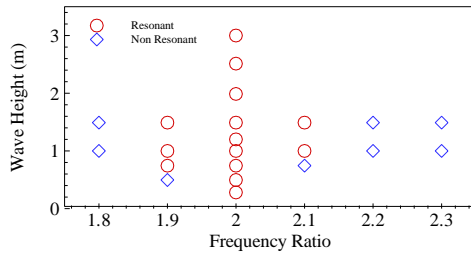


Figura 3: Áreas de estabilidad. Ensayos en canal.  $F_n = 0$ .

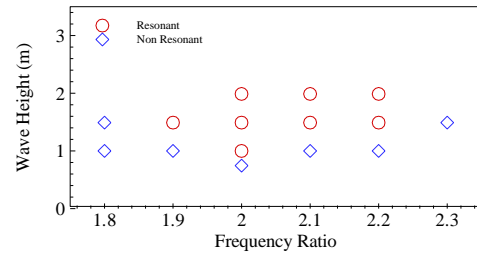


Figura 5: Áreas de estabilidad. Ensayos en canal.  $F_n = 0.2$ .

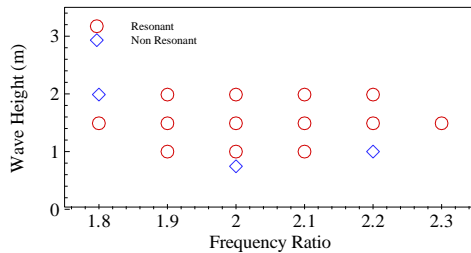


Figura 4: Áreas de estabilidad. Ensayos en canal.  $F_n = 0.1$ .

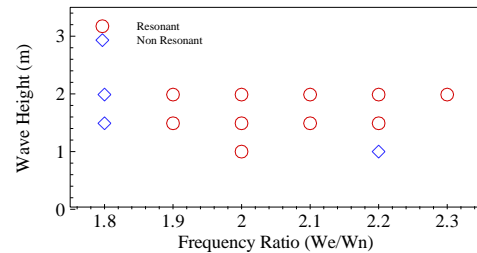


Figura 6: Áreas de estabilidad. Ensayos en canal.  $F_n = 0.3$ .

Como puede determinarse de la observación de dichos diagramas, el vértice inferior de la zona inestable está situado a menores alturas de ola para aquellos casos con menor velocidad, y dicha área se desplaza hacia arriba a medida que la velocidad aumenta. Este hecho es debido al aumento del amortiguamiento con la velocidad, que implica que una mayor excitación sea necesaria para generar el fenómeno

Asimismo, puede también apreciarse que para velocidad cero, el ancho de la zona inestable es mucho menor, y que a medida que la velocidad se incrementa, el área inestable se hace más ancha, extendiéndose especialmente hacia ratios crecientes de frecuencias. Tal y como se describe en [8], este comportamiento es debido al acoplamiento entre los movimientos de cabeceo y arfada y el balance, e implica que, a medida que la situación de navegación se aleja del ratio de frecuencias correspondiente al vértice de la zona inestable, la resonancia pueda desarrollarse para alturas de ola inferiores a medida que se incrementa la velocidad.

En todo caso, a partir de los ensayos realizados puede detectarse la gran susceptibilidad de este tipo de buque a la aparición de resonancia paramétrica. Especialmente a bajas velocidades, puede observarse que la altura de ola necesaria para excitar el fenómeno, si las condiciones de frecuencia son propicias, es muy reducida (inferior a 0.5 m para ratios de frecuencias iguales a 2), y cercana a 1 m en el resto de condiciones, lo que pone de manifiesto la necesidad de tener en cuenta este tipo de fenómeno a la hora de evaluar la seguridad de este tipo de diseño.

## Modelo Numérico

Una vez realizados los ensayos en canal anteriormente descritos, se ha diseñado e implementado un modelo matemático del comportamiento del buque, herramienta que permite realizar cálculos más extensivos respecto a la aparición del fenómeno de resonancia y que podrá ser utilizado en un sistema embarcado para evaluar el riesgo de aparición de resonancia en distintas condiciones de carga.

Para ello, se ha buscado una estructura lo más simple posible, de modo que tanto la realización de los cálculos como su modificación para adaptarlo a las diferentes condiciones o tipos de buques, sean lo más rápidos y sencillos posibles, manteniendo una adecuada precisión.

Con este objetivo, se ha diseñado e implementado un modelo no lineal de un grado de libertad, en el que para la obtención del movimiento de balance del buque, se incluye también la influencia que cabeceo y arfada

tienen sobre el mismo. La formulación general de dicho modelo, para el caso de mares longitudinales, es la siguiente:

$$(I_{xx} + A_{44}) \cdot \ddot{\phi} + B_{44,T}(\dot{\phi}) \cdot \dot{\phi} + C_{44}(\phi, t) = 0 \quad (1)$$

En donde  $I_{xx}$  representa la inercia del buque respecto al eje longitudinal,  $A_{44}$  es la masa añadida,  $B_{44T}$  es el amortiguamiento del balance y  $C_{44}$  representa el coeficiente restaurador. Puede observarse la ausencia de momentos excitadores externos; en el caso ideal de olas longitudinales, no existe excitación transversal sobre el buque.

Los términos de inercia e inercia añadida se obtuvieron a partir de un ensayo de amortiguamiento a velocidad cero, realizado durante la campaña de ensayos anteriormente descrita, mediante la medición de la frecuencia de balance del modelo y conociendo el desplazamiento del buque y su altura metacéntrica en dicha condición.

Respecto al amortiguamiento, se ha planteado una aproximación no lineal, debido a que este dista mucho de ser lineal a los grandes valores de balance producidos durante los fenómenos de resonancia [9]. Dicha aproximación consiste en la subdivisión del amortiguamiento en un término lineal y otro cuadrático, del modo siguiente:

$$B_{44,T}(\dot{\phi}) \cdot \dot{\phi} = B_{44a} \cdot \dot{\phi} + B_{44b} \cdot \dot{\phi} \cdot |\dot{\phi}| \quad (2)$$

En donde los coeficientes  $B_{44a}$  y  $B_{44b}$ , que representan el coeficiente lineal y el cuadrático respectivamente, se obtienen experimentalmente a partir de ensayos de amortiguamiento a distintas velocidades, utilizando el procedimiento descrito en [10].

Por último, el coeficiente de restauración transversal,  $C_{44}$ , se obtiene a partir de la curva de brazos adrizantes (GZ) que, como es bien conocido, depende de la escora. Sin embargo, en el caso que nos ocupa, dicha curva de GZ es también dependiente del tiempo, ya que la estabilidad transversal del buque, que a su vez es función de la superficie en flotación, variará con el paso de las olas a lo largo de la eslora. Este término es el que proporcionará al sistema la excitación paramétrica necesaria para poder reproducir el fenómeno de resonancia. Su expresión analítica es la siguiente:

$$C_{44}(\phi, t) = \Delta \cdot GZ(\phi, t) \quad (3)$$

El término  $GZ(\phi, t)$  representa la curva de GZ del buque en función del tiempo, es decir, de la posición de la ola a lo largo de la eslora en cada instante. Dicha curva dependerá, a su vez, de los parámetros fundamentales de la ola a considerar, es decir, longitud de onda y altura. Así pues, para cada ola, los valores de los brazos adrizantes del buque pueden definirse como una superficie, dependiente de la posición de la misma y del ángulo de escora, tal y como la de la Figura 7.

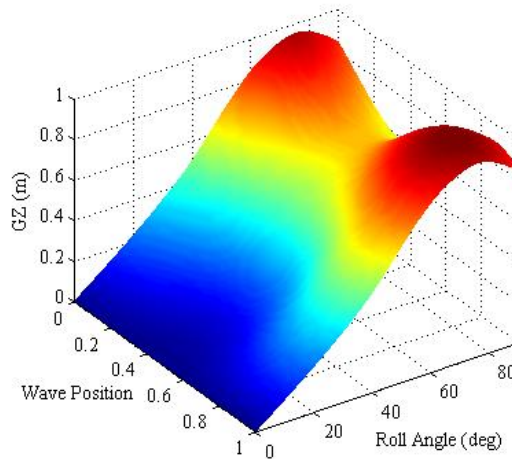


Figura 7: Curva de GZs en función de la posición de ola.  
 Altura de ola = 2 m. Longitud de onda =40 m.

En este trabajo, los valores de GZ para cada conjunto de parámetros se han obtenido utilizando una aproximación cuasi estática para los movimientos de arfada y cabeceo. Para cada posición de ola a lo largo de la eslora y para cada valor de escora deseado, se ha obtenido el equilibrio estático del buque (incluyendo arfada y trimado) y el GZ correspondiente a dicha situación. De este modo, se incluye en el modelo el posible efecto del cabeceo y la arfada en el desarrollo de la resonancia paramétrica, aunque de un modo estático, no dinámico. Esta aproximación se ha demostrado como válida en olas de popa con gran longitud de onda y en ciertos casos con olas de proa [11]. Sin embargo, y como se describirá posteriormente, para el caso de buques con gran tendencia al cabeceo y olas de reducida longitud de onda, el sistema tiende a subestimar la influencia del cabeceo y la amplitud del balance generado.

Una vez definido e implementado el modelo y calculados los diferentes parámetros del mismo, su funcionamiento se validó frente a los datos obtenidos en la campaña de ensayos anteriormente descrita, analizando tanto su capacidad para definir en qué condiciones se produce resonancia y en cuáles no, como su precisión para calcular la amplitud resultante en aquellos casos en que la resonancia efectivamente se produzca.

Respecto al primero de ambos puntos, la capacidad del modelo para definir las áreas de estabilidad e inestabilidad ha resultado ser adecuada, considerando para el cálculo olas de longitud de onda constante e igual a la eslora del buque. En las Figuras 8 a 11 se representan las áreas de inestabilidad obtenidas mediante el modelo matemático para los cuatro valores de velocidad. Sobre dichas áreas se han superpuesto los casos experimentales descritos anteriormente (donde los puntos verdes representan casos sin resonancia, y los rojos representan situaciones con ella).

Como puede apreciarse, la correspondencia entre los resultados numéricos y experimentales, especialmente en los casos con mayor velocidad, es muy buena, y puede concluirse que el modelo es capaz de definir con precisión las zonas de riesgo en que el buque puede sufrir resonancia paramétrica.

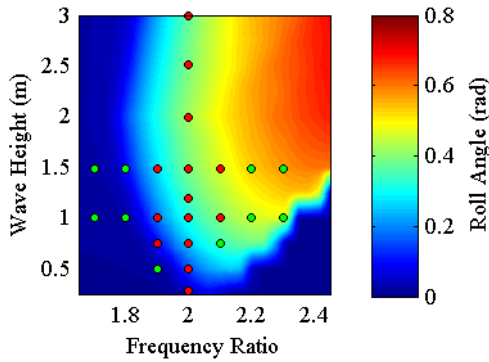


Figura 8: Áreas de estabilidad. Modelo numérico.  $F_n = 0$ .

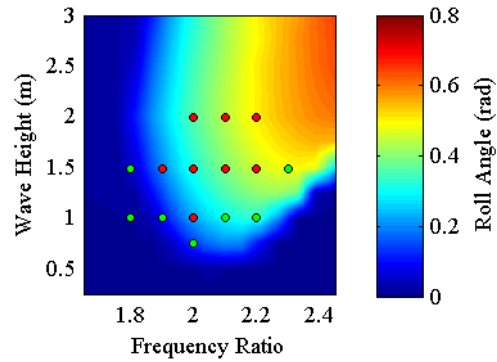


Figura 10: Áreas de estabilidad. Modelo numérico.  $F_n = 0.2$ .

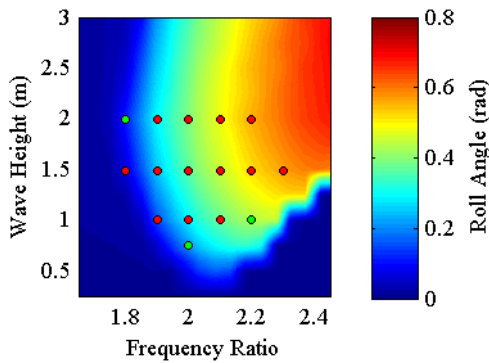


Figura 9: Áreas de estabilidad. Modelo numérico.  $F_n = 0.1$ .

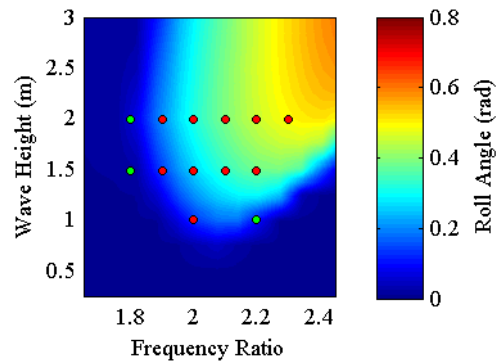


Figura 11: Áreas de estabilidad. Modelo numérico.  $F_n = 0.3$ .

Respecto a la precisión del modelo para calcular la amplitud del fenómeno en aquellos casos en que se produzca y bajo condiciones realistas con longitud de onda variable y función de la frecuencia (teoría de olas de Airy, aproximación para aguas profundas), los resultados han sido contradictorios. Mientras que han sido muy prometedores para los casos de menor velocidad (ver Figuras 12 y 13), el modelo es incapaz de obtener con precisión la amplitud para los casos de mayor velocidad. Esto es debido a la subestimación de la influencia de cabeceo y arfada que implica la suposición de cuasi estaticidad en el cálculo del coeficiente restaurador descrita anteriormente. Como ha podido apreciarse en los ensayos experimentales, el cabeceo del buque en todas las condiciones ha resultado muy elevado y en todos los casos, superior al calculado por el modelo numérico.

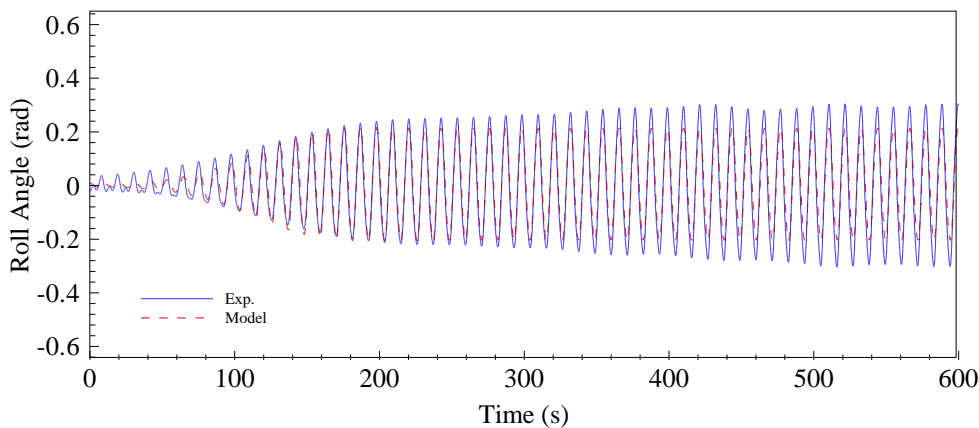


Figura 12: Movimiento de balance. Comparación entre el modelo numérico y los ensayos experimentales.  $F_n = 0$ . Ratio de frecuencias = 2.0. Altura de ola = 1.000 m. Longitud de onda = 48.640 m



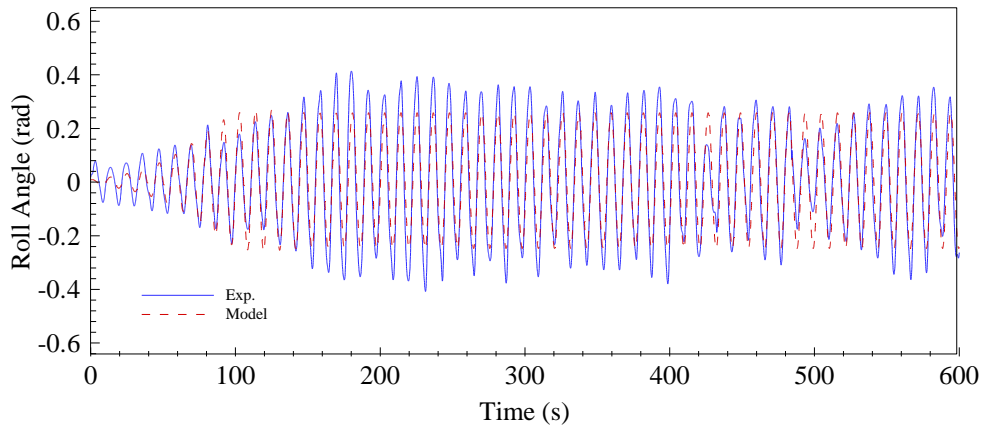


Figura 13: Movimiento de balance. Comparación entre el modelo numérico y los ensayos experimentales.  
 $F_n = 0.1$ . Ratio de frecuencias = 2.0. Altura de Ola = 1.491 m. Longitud de onda = 66.145 m.

A pesar de este hecho, los resultados obtenidos indican que el método propuesto puede utilizarse como una primera aproximación para evaluar, en un sistema embarcado, las zonas de riesgo de aparición de resonancia durante la navegación del buque.

Dicho sistema podría utilizar la base presentada en [7] mediante la cual pueden obtenerse los valores de estabilidad transversal de un modo aproximado y que dispone de una interfaz sencilla en que mostrar los datos y niveles de riesgo al patrón del buque.

A partir de dicha aproximación, sería necesario establecer un método simplificado, tal y como el propuesto en [4], para poder obtener los parámetros de ola a partir de la observación de la misma, o bien un sistema automático que permitiese determinar estos a partir del movimiento del buque, para suministrar al modelo matemático todos los valores necesarios para efectuar la evaluación del riesgo en cada instante. Ambas tareas se encuentran, en la actualidad, en fase de desarrollo para su implementación en la citada aplicación.

### ***Conclusiones y trabajo futuro***

En este trabajo se ha presentado los resultados obtenidos para desarrollar un sistema embarcado que permita evaluar el nivel de riesgo de un buque, en este caso un arrastrero de tamaño medio, típico de la flota española de Gran Sol, de sufrir el fenómeno de resonancia paramétrica cuando se encuentre en operación.

Dicho sistema está basado en un modelo numérico no lineal simplificado del balance del buque, en que los efectos del cabeceo y la arfada se tienen en cuenta bajo una perspectiva cuasi estática al calcular la curva de brazos adrizantes del buque en función del tiempo.

Con el objetivo de analizar y validar el citado modelo, se ha realizado una campaña de ensayos en canal de experiencias hidrodinámicas, de la que se han obtenido los datos experimentales necesarios para este fin, pero que también han proporcionado un conocimiento realista del comportamiento del buque en condiciones de resonancia paramétrica. De hecho, estos ensayos han mostrado la alta tendencia que este tipo de diseño tiene a sufrir dicho fenómeno, incluso en condiciones de oleaje muy poco severas.

Una vez validado, el modelo matemático ha sido utilizado para evaluar las áreas de riesgo para una serie de condiciones de navegación, incluyendo cuatro velocidades diferentes, en mares longitudinales de proa y para determinar la amplitud de balance alcanzada en aquellos casos en que se produce resonancia paramétrica.

Los resultados obtenidos han sido muy satisfactorios en cuanto a la predicción de las áreas de estabilidad del buque, obteniendo aproximaciones muy adecuadas en comparación con los datos de los ensayos en canal. En el caso de la predicción de la amplitud del movimiento de balance en condiciones de resonancia, los resultados obtenidos muestran una buena concordancia para las condiciones de menor velocidad, pero no han sido adecuados para las mayores velocidades, en las que el movimiento de cabeceo calculado mediante el modelo matemático ha resultado muy inferior al observado en los ensayos en canal.

Los algoritmos desarrollados podrán integrarse en la plataforma de ayuda al patrón desarrollada por los autores [7], que proporciona parte de la información necesaria por el modelo, así como la interfaz de comunicación con el personal del buque. Sin embargo, es necesario desarrollar una metodología para suministrar a la aplicación los datos meteorológicos necesarios para su correcto funcionamiento.

De hecho, el trabajo futuro en este proyecto está dirigido principalmente a este último punto; desarrollar algoritmos que permitan, a partir de los datos de movimiento del buque, proporcionar al sistema la información relativa a la altura, frecuencia y longitud de onda de las olas incidentes, sin que sea necesaria la intervención de la tripulación, tal y como sucede en las guías de la IMO [4].

Por último, es necesario también mejorar el rendimiento del modelo numérico en las condiciones de mayor velocidad, de modo que además de poder obtener las áreas de riesgo, pueda realizarse una predicción de la amplitud de balance que indique el grado de severidad (y por tanto del nivel de riesgo), de una determinada condición.

## ***Referencias***

- [1] Fossen, T. I., Nijmeijer, H. Parametric Resonance in Dynamical Systems. New York, USA. Springer. 2012.
- [2] de Juana Gamo, J., Rodrigo, C. A., Rojas, L. P. On the parametric rolling of fishing vessels. International Conference on Marine Research and Transportation, Ischia, Italy. 2005.
- [3] Neves, M. A. S., Perez, N., Valerio, L. Stability of small fishing vessels in longitudinal waves. Ocean Engineering, 26(12), 1389-1420. 1999.
- [4] International Maritime Organization. Revised Guidance to the Master for Avoiding Dangerous Situations in Adverse Weather and Sea Conditions (Vol. IMO MSC.1/Circ. 1228). IMO Maritime Safety Committee. 82nd session. 2007.
- [5] Amarcon-BV. Amarcon and Technical University of Denmark Develop System for Parametric Roll Warnings. 2011. Consultado el 3/06/2012, de <http://www.ship-technology.com>.
- [6] Galeazzi, R., Blanke, M., Poulsen, N. K. Early Detection of Parametric Roll Resonance on Container Ships. IEEE Transactions on Control Systems Technology, PP (99). 2012.
- [7] Míguez González, M., Caamaño Sobrino, P., Tedín Álvarez, R., Díaz Casás, V., Martínez López, A., López Peña, F. Fishing vessel stability assessment system. Ocean Engineering, 41, 67-78. 2012.
- [8] Neves, M. A. S., Rodriguez, C. A. Influence of non-linearities on the limits of stability of ships rolling in head seas. Ocean Engineering, 34(11-12), 1618-1630. 2007.

- [9] Neves, M. A. S., Rodríguez, C. A. On unstable ship motions resulting from strong non-linear coupling. *Ocean Engineering*, 33(14-15), 1853-1883. 2006.
- [10] Himeno, Y. Prediction of Ship Roll Damping. A State of the Art. Michigan, USA. Department of Naval Architecture and Marine Engineering. The University of Michigan College of Engineering. 1981.
- [11] Bulian, G. Development of analytical nonlinear models for parametric roll and hydrostatic restoring variations in regular and irregular waves. PhD Thesis, Università Degli Studi di Trieste, Trieste, Italy. 2006.