

# Balance of a Fishing Boat thru Parametric Excitation in Regular or Irregular Waves With Numerical Simulation

José R. Marín L., Ph.D.<sup>1</sup>, Marco S. Sotelo Z., Ing. Nava<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas, Oceánicas y Recursos Naturales, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, jrmarin@espol.edu.ec

<sup>2</sup>Astilleros Navales Ecuatorianos, Guayaquil, Ecuador, msotelo@astinave.com.ec

**Abstract-** Using numerical simulations, the paper analyzes the phenomenon known as Parametric Resonance as it pertains to the movement of an Ecuadorian fishing boat that capsized off the Galapagos Islands. Prior to the study a determination was made whether the characteristics of the doomed vessel in operation or design a developed a dynamic instability due to parametric resonance which resulted in a sweeping answer that explains the incident. Even when considering the capacity of shock absorbing as a first check of vulnerability one would think that the parametric resonance would cause a vessel to capsize. A numerical simulation proves this result. The ocean's surface is defined by starting at the harmonic distortion of the Spectral Density function of the state of the Sea using the Bretschneider formula. Following this, GRIM's algorithm of wave improvement equivalence to represent in simplified form the ocean's surface at every point in time. Following this, using the values previously calculated pertaining to the righting lever the angle of inclination and the wave equivalent can be interpolated. For the deadening a constant equivalent coefficient was selected and radius of added rotation due to hydro-dynamic effects was calculated as a percentage of the vessel's greatest width. This approach will have evaluated the terms that allow to integrate in time the movement of the vessel which in this paper was developed using the Runge-Kutta method (4th order).

**Keywords--** Parametric Resonance, Dynamic Instability.

Digital Object Identifier (DOI) <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2016312>

ISBN: 9780-9822897-3

ISSN: 2414-390

# Balance de un buque pesquero por excitación paramétrica en olas regulares e irregulares con simulación numérica

José R. Marín L., Ph.D.<sup>1</sup>, Marco S. Sotelo Z., Ing. Naval<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas, Oceánicas y Recursos Naturales, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, jrmarin@espol.edu.ec

<sup>2</sup>Astilleros Navales Ecuatorianos, Guayaquil, Ecuador, msotelo@astinave.com.ec

**Resumen**— En este trabajo se analiza a través de simulaciones numéricas, el fenómeno de Resonancia Paramétrica en el movimiento de Balance de un buque pesquero ecuatoriano que zozobró en aguas de las Islas Galápagos. Se pretende en forma preliminar determinar si es posible que las características del pesquero accidentado y en sus condiciones de operación se desarrolle una inestabilidad dinámica por resonancia paramétrica que llevó a una respuesta de grandes amplitudes que explique lo ocurrido. Para esto, se analiza la respuesta dinámica del Balance desacoplado del buque, es decir, independiente de los restantes movimientos y asumiéndolo como un cuerpo rígido, en olas de Proa, regulares e irregulares. Aún cuando considerando el nivel de amortiguamiento como un primer chequeo de vulnerabilidad se espera que la resonancia paramétrica no cause zozobra, se desarrolla la simulación numérica para comprobar este resultado. La superficie del mar se la define a partir de la descomposición armónica de la función Densidad Espectral del estado de Mar, empleando la formulación de Bretschneider. Se emplea luego el algoritmo de ola equivalente mejorada de Grim para representar en forma simplificada la superficie del mar en cada instante de tiempo. Luego a partir de valores previamente calculados del brazo adrizante se interpola este valor para el ángulo de inclinación y la ola equivalente. Para el amortiguamiento se tomó un coeficiente equivalente constante, y el radio de giro añadido por efectos hidrodinámicos se tomó como un porcentaje de la manga del buque. De esta manera se habrán evaluado los términos que permitan integrar en tiempo el movimiento del buque, que en este trabajo se ha desarrollado mediante el método de Runge-Kutta de cuarto orden.

**Keywords**—Resonancia Paramétrica, Inestabilidad dinámica.

## I. INTRODUCCIÓN

Los buques pesqueros en general, operan en zonas alejadas de la costa y son de dimensiones pequeñas comparadas con otros tipos de buques, lo cual los hace propensos a sufrir accidentes en el mar, desafortunadamente con pérdidas humanas en algunos casos. Para asegurarse que los pesqueros disponen de características mínimas en lo referente a Estabilidad, la Organización Marítima Internacional, OMI, estableció criterios que deben cumplirse en condición del buque intacto. Estos requerimientos mínimos se refieren principalmente al momento de Adrizamiento, esto es, al par de fuerzas que trata de regresarlo a la posición recta, cuando el buque se inclina hacia un costado, [1]. Sin embargo se siguen produciendo accidentes, algunos de los cuales se asocian con fenómenos de naturaleza dinámica, que ha hecho que la OMI haya empezado

desde hace algunos años a considerarlos en la Segunda generación de criterios de estabilidad Intacta, [2]. Con estas nuevas regulaciones se intenta evaluar específicamente si un buque en particular es propenso a zozobrar en uno de los modos de falla considerados, uno de los cuales es el Balance Paramétrico. Al movimiento de rotación respecto del eje longitudinal del buque se lo denomina Balance, ó ángulo de Escora. Dado que el alcanzar la zozobra implica grandes ángulos de escora ó balance, estos fenómenos dinámicos implican gran complejidad analítica, y una opción para empezar a estudiarlos es a través de simulaciones numéricas.

### A. Motivación y Objetivos

Cuando un buque se balancea, esto es, se inclina hacia un costado, la fuerza de Empuje se desplaza lateralmente, y con el Peso, forma un par de fuerzas que trata de regresar al cuerpo a su posición recta, ó adrizada. Este momento se puede expresar como el producto del Peso por la distancia que separa a las fuerzas mencionadas, conocida como Brazo adrizante,  $GZ$ , que puede asumirse que sigue una variación lineal con el ángulo de escora, cuando este es pequeño. Si este ángulo de escora sigue incrementándose, el brazo alcanza valor un máximo y luego empieza a reducirse, hasta volverse nulo; en esta situación el buque no tiene la capacidad de regresar a la posición recta, y se considera que ha zozobrado.

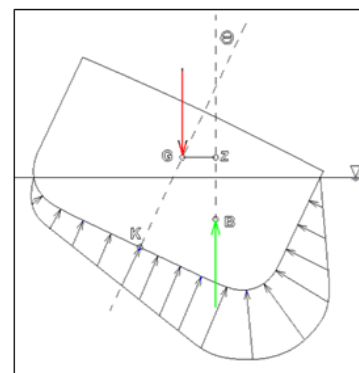


Fig. 1 Equilibrio dinámico de un buque.

La Organización Marítima Internacional, OMI, es el ente a nivel mundial que establece requerimientos mínimos que los buques deben satisfacer, tratando de reducir los accidentes en

el mar. Los actuales criterios de Estabilidad Intacta de buques emplean requerimientos mínimos que la curva de brazos adrizantes debe cumplir, [1], se basan básicamente en conceptos de la Estática del buque. Ahora bien, el desarrollo de accidentes de buques, asumiéndose que cumplían los requerimientos de estabilidad, ha motivado a la OMI a tratar de establecer la llamada Segunda Generación de Criterios de Estabilidad Intacta, [2]. En esta nueva regulación se insiste en considerar diferentes modos de falla ó zozobra de origen Dinámico, y empieza por establecer la posibilidad de que una embarcación a través de la aplicación de criterios de Vulnerabilidad de cada uno de ellos.

Los modos de zozobra que están siendo considerados por la OMI en esta nueva generación de análisis de estabilidad, son: Resonancia Paramétrica, Surf-riding combinado con Guiñada súbita, Pérdida pura de estabilidad, y, condición del buque sin propulsión. En todos los casos, se empieza por determinar en forma general si la embarcación considerada puede por sus características principales, sufrir de este modo de falla. Esto se hace a través de aplicar los denominados criterios de vulnerabilidad. Si se determina que la embarcación de acuerdo a estos criterios es proclive a sufrir este tipo de falla, se debe proceder a desarrollar análisis más avanzados, e inclusive a que la autoridad marítima correspondiente establezca procedimientos operativos particulares para otorgarle el permiso respectivo.

Dado que se trata de determinar la posibilidad de que la embarcación zozobre, los ángulos de escora considerados en los niveles más avanzados del criterio de estabilidad de esta nueva generación incluyen procesos matemáticos complejos, algunos de los cuales no están completamente definidos. En esta situación, una opción para aproximar una solución a estos problemas dinámicos es la simulación numérica, partiendo de condiciones iniciales particulares.

En el presente trabajo se desarrollaron simulaciones numéricas de la Resonancia paramétrica de un buque pesquero ecuatoriano que zozobró en los últimos años, [3]. Se pretende determinar en forma primaria la posibilidad de que este tipo de buques sea proclive a este fenómeno. Además, dada el poco conocimiento en este aspecto de la seguridad de buques, es conveniente que se empiece a conocer los conceptos y técnicas básicas para su análisis, de manera que se pueda en el futuro operar este tipo de buques con mayor seguridad.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Resonancia Paramétrica de un buque

Considerando un buque navegando en olas de Proa ó Popa, la ecuación de movimiento para el ángulo de escora desacoplado,

$\theta$ , véase la Fig. 1, es de tipo homogéneo, con el coeficiente del término restaurado dependiente del tiempo, [4]:

$$(I_{xx} + A_{44})\ddot{\theta} + B_{44}\dot{\theta} + W * GZ(\theta, t) = 0. \quad (1)$$

La suma  $(I_{xx} + A_{44})$  es conocida como la inercia virtual y resulta de sumar el segundo momento de la distribución de masa del buque respecto del eje longitudinal y la inercia añadida, resultante de la acción hidrodinámica proporcional a la aceleración angular.  $B_{44}$  es el coeficiente del amortiguamiento,  $W$  es el Peso del buque, y  $GZ$  es el brazo adrizante, dependiente del ángulo de escora y del perfil de la ola. En el presente caso no se ha considerado el efecto del viento, que aparecería como un término independiente en la ecuación. Entonces, en el caso tratado, la ecuación es no lineal debido a la dependencia del brazo adrizante respecto del ángulo de escora, y también porque si el movimiento se desarrollara con altas amplitudes, el coeficiente del amortiguamiento dependería de la velocidad angular.

Dividiendo la ecuación del movimiento para la combinación de la inercia seca y la añadida:

$$\ddot{\theta} + d(\dot{\theta}, V)\dot{\theta} + \omega_o^2 \left( \frac{GZ(\theta, t)}{GM_o} \right) = 0, \quad (2)$$

donde  $\omega_o$  es la frecuencia natural de Balance,  $\sqrt{\frac{g GM_o}{k_{xx}}}$ ,

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $k_{xx}$  es el radio de giro virtual del buque. El término  $GM_o$  representa la pendiente de la curva de brazos adrizantes, para valores pequeños de ángulos de escora, y  $k_{xx}$  es el radio de giro virtual:  $k_{xx}^2 = (I_{xx} + A_{44})g/W$ .

La ecuación diferencial de Balance tratada es similar a la de Mathieu, también de tipo homogénea, y en la que el coeficiente de la función tiene una combinación de constante más un término armónico:

$$\ddot{\xi} + (p + q \cos(t))\xi = 0. \quad (3)$$

La solución de esta ecuación homogénea tiene zonas de Inestabilidad, bajo combinaciones de los coeficientes  $p$  y  $q$ , como muestra la Fig. 2. Si bajo una combinación de estos parámetros un sistema cae dentro de una de las zonas marcadas en rojo, la trivial es una solución Inestable, y por tanto la solución a esta ecuación homogénea es no nula. El coeficiente  $p$  denota el cuadrado de la frecuencia natural, y  $q$  implica la variación del coeficiente de la función. En la Figura 2, la región de mayor ancho es la I, que está asentada alrededor de un valor de  $p$  igual a 0.25. De manera que esta

región se presenta alrededor de una razón de variación igual al doble de la natural. Además, conforme el nivel de variación  $q$  se incrementa, el ancho de la región de inestabilidad se incrementa, haciendo posible una mayor variación de la frecuencia del término armónico que aún podría significar respuesta no nula del sistema.

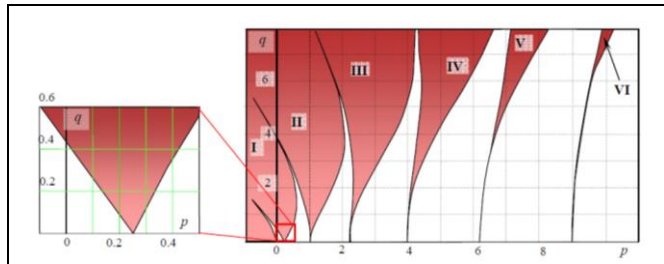


Fig. 2. Regiones de inestabilidad dinámica de la solución de la ecuación de Mathieu, [2]

En el caso en que se incluya el término de amortiguamiento, la disipación de energía implícita, reduce las regiones de inestabilidad como se muestra en la Fig. 3. En este caso se muestra que para valores de la amplitud de la variación del coeficiente de la función, menores de 0.10 aproximadamente, ahora no hay situaciones de inestabilidad dinámica, y la respuesta del sistema es nula.

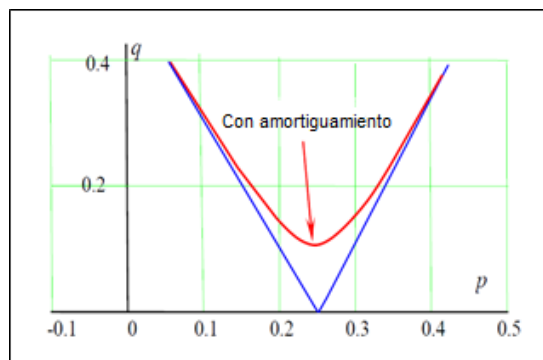


Fig. 3. Influencia del amortiguamiento en las regiones de inestabilidad dinámica

Entonces, comparando la ecuación del movimiento de Balance de un buque (2) con la de Mathieu (3), bajo ciertas combinaciones de frecuencia de encuentro y variación del coeficiente del efecto de adrizamiento, se puede esperar oscilación, aún para el caso en que las olas se reciben de Proa ó Popa; esto es a pesar de que el problema es homogéneo. Esta es la denominada Resonancia Paramétrica. Dado que en el caso del movimiento de Balance del buque, el amortiguamiento está presente, se puede esperar que para bajos niveles de variación del coeficiente de adrizamiento, habrá oscilación pero con poca amplitud. Finalmente la región de mayor área en la que se espera esta oscilación es la I, y está caracterizada por una frecuencia de encuentro igual al doble que la natural.

## B. Representación de la Superficie Irregular del mar

La superficie del mar en forma simplificada se puede considerar como la suma de un número de armónicos, y la distribución de la contribución de cada uno de estos se resume en la función Densidad espectral, ó función Espectro [4]. A su vez, esta función se puede expresar aplicando diferentes formulaciones desarrolladas a partir de múltiples observaciones. En el presente caso, se va a utilizar la formulación de Bretschneider, que requiere de dos parámetros para su desarrollo:

$$S(\omega) = \left( \frac{5(\omega_m)^4}{16\omega^5} \right) \left( H_{1/3} \right)^2 e^{\frac{-5\omega_m^4}{4\omega^4}}, [m^2 \text{ seg}] , \quad (4)$$

donde  $\omega_m$  es la frecuencia modal (para la cual la función  $S$  es máxima), y  $H_{1/3}$  la altura significativa del estado de Mar considerado.

La amplitud de cada componente armónico se la puede calcular como:  $\sqrt{2 \cdot \Delta\omega \cdot S(\omega)}$  donde,  $\Delta\omega$  es el ancho de la partición. A su vez, cada componente armónico tendrá la frecuencia correspondiente al valor central del intervalo, la que a su vez se relaciona con la longitud de ola,  $\lambda$ , por la relación de Dispersión de la teoría de olas gravitacionales,  $\omega = \sqrt{k g} = \sqrt{2\pi g / \lambda}$ .

Una vez representada la superficie como la combinación de armónicos, se obtiene una función con forma irregular, que dificulta el cálculo del momento adrizante. Para encontrar una ola equivalente a la superficie irregular instantánea, se puede aplicar el concepto de Ola equivalente de Grim mejorada, [5], que estima la amplitud y posición de una ola armónica que se ajusta a la superficie irregular. Para este proceso se debe establecer la longitud de la ola equivalente, y para el cálculo de la Resonancia paramétrica, se recomienda tomar un valor igual a la eslora del buque, véase Fig. 4 para un ejemplo:

$$z_{IGEW}(x,t) = a(t) + \eta_c(t) \cos\left(\frac{2\pi}{L}x\right) + \eta_s(t) \sin\left(\frac{2\pi}{L}x\right). \quad (5)$$

Esta ola equivalente tiene algunas características, que se van a manifestar en las simulaciones del movimiento de balance del buque pesquero. Entre las principales está el que la amplitud y velocidad de avance no son constantes. Además, como se mencionó previamente, la ola generada depende de la longitud que en el presente caso es la eslora del buque, de acuerdo a lo recomendado en [2]. El hecho de que la

velocidad no es constante hace difícil la sincronización entre la excitación paramétrica y la respuesta resonante del buque.

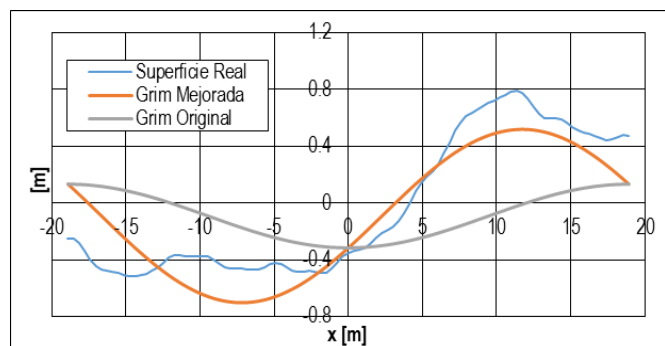


Fig. 4. Ola equivalente a la superficie irregular, [3]

### C. Estimación del Brazo Adrizante del buque

Si se desea analizar en forma desacoplada el movimiento de Balance del Levantamiento (traslación en dirección vertical) y del Cabeceo (rotación respecto de un eje lateral), habría que ubicar en un instante dado el buque de tal manera que el desplazamiento coincida con el Peso, y que dicha fuerza coincida longitudinalmente con el centro de Gravedad. Una vez ubicado el centro de Boyantez, se podría determinar la distancia en dirección transversal entre las fuerzas mencionadas, que representaría el brazo adrizante, véase la Fig. 1. Para el cálculo descrito entonces habría que partir de la amplitud de la ola, su posición respecto del buque, y del ángulo de escora.

Para estimar el brazo adrizante del buque, es decir la distancia entre las líneas de acción del Peso y la Boyantez, que denota la capacidad del buque para regresar a su posición vertical, en este trabajo se ha aplicado una interpolación a partir de una regresión polinomial. Se parte de los resultados del cálculo del brazo adrizante para diferentes valores de altura de ola, posición de la ola y ángulo de balance, que fueron desarrollados previamente. Luego, en cada iteración, una vez definida la ola incidente, es decir conociendo su amplitud y posición, y conocido el ángulo de escora, instantáneos, se desarrolla una Regresión polinomial de orden 5, y se obtiene el brazo adrizante en la situación analizada, [6]. Este valor servirá para calcular la nueva inclinación equilibrando dinámicamente el buque.

En la Fig. 5 se muestra la variación del brazo adrizante para el buque pesquero que será analizado posteriormente, en función del ángulo de escora y de la altura de la ola incidente. En el caso mostrado, la cresta de la ola se encuentra en Sección Media del buque, y dado que su longitud es igual a la eslora del buque, en esta situación se tienen sendos senos de la ola en Proa y Popa. En esta situación, se produce una reducción fuerte de los anchos seccionales en los extremos, y como resultado la inercia del plano de flotación disminuye, y

por tanto la pendiente de la curva de brazos adrizantes. Esto se nota en la figura cuando al incrementar la altura de la ola, se llega a valores negativos del brazo adrizante para alturas de ola sobre los 2.80 metros, para valores pequeños del ángulo de escora, en la condición de Carga 1.

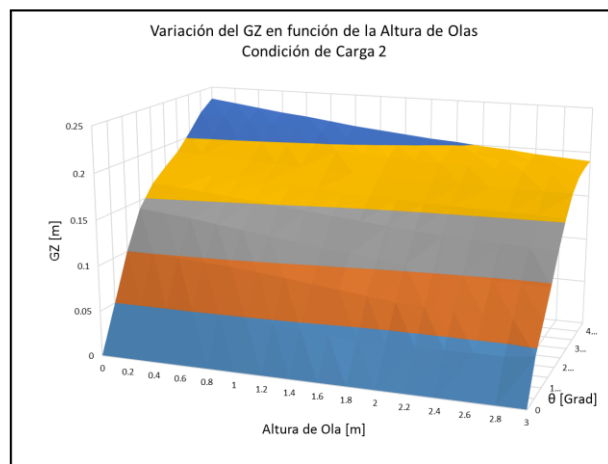
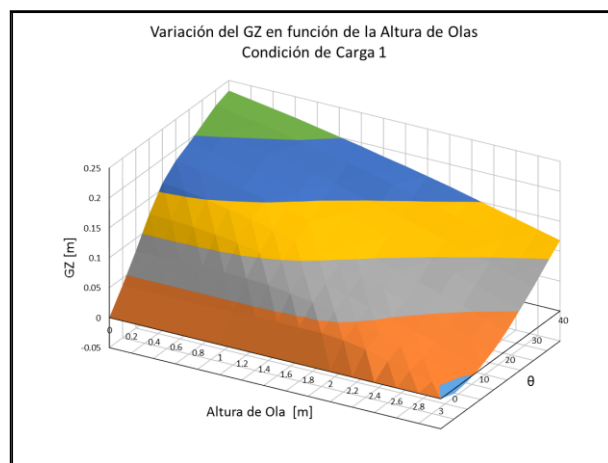


Fig. 5. Variación del brazo adrizante para un pesquero ecuatoriano, con la cresta de la ola en Sección Media, [3], Condición de carga 1 y 2

### D.- Amortiguamiento en Balance

El amortiguamiento en un proceso dinámico implica disipación de energía, y por tanto una limitación al incremento de las amplitudes de la respuesta. En el caso del movimiento de Balance del buque, existen algunos modelos para estimar el coeficiente debido al amortiguamiento, por ejemplo el proceso clásico de Himeno, [7]. Este modelo incluye expresiones empíricas para estimar los componentes del amortiguamiento por: fricción, formación de torbellinos (“eddies”), fuerza de sustentación (que depende de la velocidad de avance del buque), formación de olas, y, quilla de balance. La formulación mencionada incluye términos para valorar la variación del coeficiente cuando las velocidades exceden los límites de la linealidad.



En el presente caso, para simplificar el proceso numérico, se tomaron valores constantes del coeficiente de amortiguamiento para cada ejecución. Los valores empleados se especifican en cada caso tratado, y se expresan como porcentaje del crítico:  $\nu = B_{44} / (2I_v \omega_0)$ , donde  $I_v$  denota la Inercia virtual y  $\omega_0$  es la frecuencia natural del movimiento de Balance.

### E. Vulnerabilidad del buque al fenómeno de Resonancia Paramétrica

El proceso de evaluación en esta nueva Generación de criterios de estabilidad intacta, se evalúa la vulnerabilidad del buque a sufrir zozobra por cada uno de los modos de falla considerados. En [2] y en [8] se menciona que dado que las regiones de inestabilidad son influenciadas muy fuertemente por el amortiguamiento, este parámetro debe considerarse para evaluar la posibilidad de falla por Balance excesivo debido a Resonancia Paramétrica en los primeros niveles. En forma primaria se menciona que el nivel de amortiguamiento adimensional debe ser mayor que 0.03 para evitar elevados ángulos de respuesta que podrían llevar a la zozobra. En [9] se desarrollaron pruebas con el modelo de un buque pesquero incluyendo el efecto de la velocidad, y se reportaron valores de amortiguamiento adimensional por encima del valor límite mencionado previamente. En la referencia mencionada el buque no tenía bulbo de Proa, pero las restantes proporciones tenían similitud con las del buque aquí tratado.

Aún cuando se trata de recomendaciones que están en desarrollo, parece que el nivel de disipación de energía en el movimiento de Balance de buques pesqueros de proporciones similares al aquí analizado son suficientes para limitar la amplitud en resonancia paramétrica. A pesar de esta conclusión, se va a proceder con la simulación numérica para confirmar este resultado.

### F. Proceso de Simulación Numérica

La ecuación de movimiento para el Balance desacoplado con olas de Proa se puede integrar en tiempo empleando el método de Runge-Kutta de 4to orden, RK4, [6], partiendo de condiciones iniciales dadas. Para un instante dado de tiempo, conocidas la velocidad angular y el ángulo de Balance, se puede representar un perfil de la elevación del mar y representarla con una ola equivalente, esto es, establecer la amplitud y posición de la ola respecto del buque. Luego interpolando a partir de los valores calculados del brazo adrizante, determinar el valor correspondiente para ese instante de tiempo. El término del amortiguamiento se considera proporcional a la velocidad angular. Con los términos mencionados se puede evaluar la aceleración angular e integrarla para estimar el siguiente valor de velocidad angular, mientras que integrando la velocidad angular se puede

estimar el siguiente valor del ángulo de escora, siguiendo las ponderaciones del RK4. Luego se toman estos nuevos valores como condiciones iniciales del siguiente intervalo. Además del ángulo de Balance y velocidad angular, también se reportan la amplitud y posición de la ola, brazo adrizante, Calado medio y asiento del buque.

Normalmente en las embarcaciones por cuestiones de operación se dejan aberturas sin cierre estanco, es decir, si el nivel de agua alcanza alguna de estas aberturas, entraría al interior del buque, y produciría extra inmersión. A la situación por la que el agua alcanza alguna abertura no estanca, se considera también como si la embarcación hubiera zozobrado. El proceso de integración numérica va comprobando que la altura a la que llega el agua, considerando el calado, asiento y escora, y, el nivel del agua considerando la amplitud y posición de la ola. En la Fig. 6 se explican los detalles del cálculo para comprobar si la ordenada de inundación excede la posición vertical de la abertura, lo que significaría que la embarcación habría zozobrado, y el proceso de simulación se detendría:

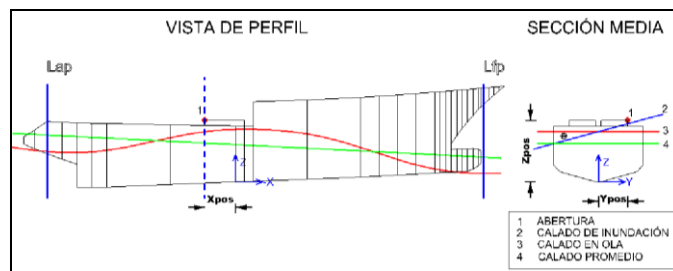


Fig. 6. Inundación instantánea equivalente a la zozobra, [3]

## III. RESULTADOS

### A. Condiciones de carga

El proceso de simulación del Balance paramétrico se va a aplicar a una embarcación pesquera ecuatoriana de tipo atunera que zozobró en el año 2012, en aguas de las Islas Galápagos. A continuación en la Fig. 7 se presenta un plano de distribución del buque, que tiene bulbo de Proa, sala de máquinas en Popa, y desde Sección media hacia Proa sobre la cubierta principal tiene una cubierta superior. Hacia Popa de sección Media, sobre la cubierta principal tiene escotillas que conducen a las bodegas. Para las simulaciones a desarrollarse, se considera que estas aberturas no tienen cierre estanco y pueden ocasionar la zozobra del buque; la posición de esta abertura es,  $x$ : -2.0,  $y$ : 2.6,  $z$ : 5.2 metros, con  $x$  medido desde Sección Media, positivo hacia Proa, y desde Crujía,  $y$ ,  $z$  desde Línea Base. En la Fig. 8 se muestran las secciones empleadas para los cálculos del Brazo adrizante.

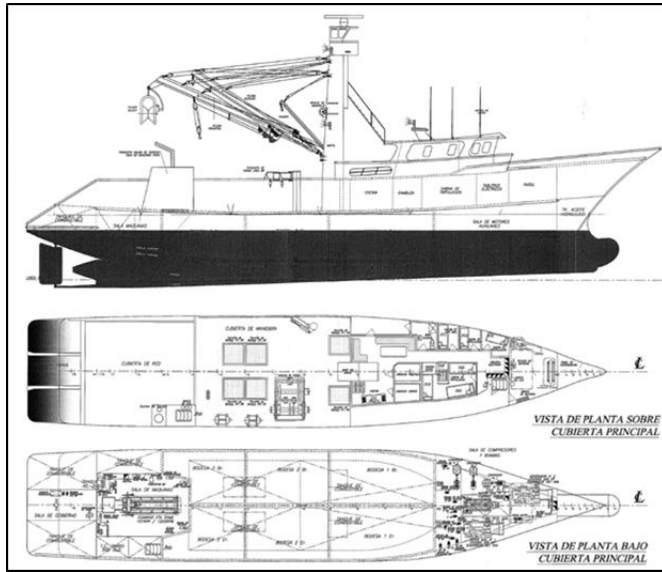


Fig. 7. Plano de distribución del buque analizado

TABLA I  
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL BUQUE ANALIZADO

Eslora total, m	45.0
Eslora entre perpendiculares, m	37.83
Manga, m	8.00
Puntal, m	4.72
Calado de diseño, m	4.55
Desplazamiento de diseño, tons	890
Coefficiente bloque	0.56
Velocidad aproximada, nudos	11.5

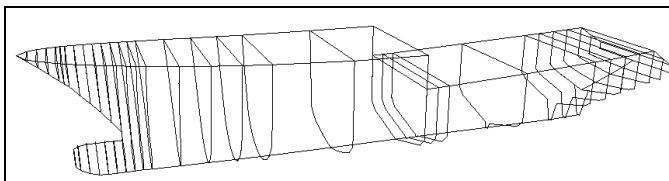


Fig. 8. Estaciones empleadas para los cálculos del brazo adrizante

Se van a considerar dos condiciones de carga, Salida de Puerto y Regreso a Puerto. En la primera se considera que los consumibles están completos, y algunas bodegas llevan salmuera en proceso de enfriamiento, mientras que en la segunda, los consumibles se encuentran al 10%, y las bodegas están llenas. A continuación en la tabla I se resumen las características principales de las condiciones de carga analizadas.

TABLA II

CARACTERÍSTICAS DE LAS CONDICIONES DE CARGA ANALIZADAS

	Condición 1	Condición 2
Desplazamiento, tons	803	906
Calado medio, m	4.06	4.43
Francobordo, m	0.61	0.35
Trimado, m (+Popa)	-0.17	-0.22
KG, m	3.62	3.51
GMo, m	0.48	0.56
$\omega_0$ , 1/seg	0.72	0.80
$\tau_0$ , seg	8.73	7.85

Para todas las simulaciones desarrolladas, se tomó como condiciones iniciales un ángulo de escora de  $3^\circ$ , y velocidad angular nula. Además luego de un análisis de convergencia de la solución se tomó un incremento del tiempo de 0.10 segundos para todas las simulaciones desarrolladas.

### B. Simulaciones en olas regulares

Se desarrollaron simulaciones durante 15 minutos ó 900 segundos. Para establecer la velocidad de las olas incidentes, se estimó la velocidad crítica, conociendo que la frecuencia de encuentro debía ser el doble de la natural, lo que produjo una velocidad de 16.93 nudos. En este caso, se tomó la eslora entre perpendiculares como longitud de ola, y la frecuencia de encuentro se evalúa como:  $\omega_e = k v_{rel}$ , donde  $k$  es el número de ola, y  $v_{rel}$ , es la velocidad relativa entre buque y ola.

A continuación en la Fig. 9 se muestra el ángulo de Balance resultado de una simulación típica, que desembocó en zozobra. La velocidad de las olas era la crítica, y la amplitud de las olas es de 1 m.

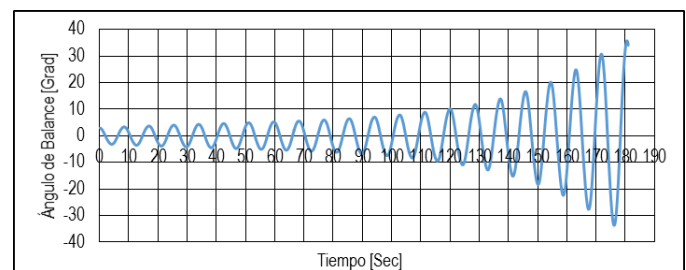


Fig. 9. Resultados típicos de simulación, Condición de carga 1

Luego de comprobar que en olas regulares se puede producir la resonancia paramétrica, se desarrollaron múltiples simulaciones variando la amplitud de las olas y la velocidad de encuentro, sin incluir amortiguamiento. Si no se producía la zozobra después de 15 minutos, se consideraba que nunca se produciría. En las Figuras 10 y 11 se resumen las condiciones en las que se produjo zozobra (puntos en rojo), en las dos condiciones de carga analizadas, sin y con amortiguamiento adimensional del 2.5%. En las abscisas, la velocidad está en

nudos. Se nota cómo la disipación de energía produce una reducción en las zonas que llevan a la zozobra del buque.

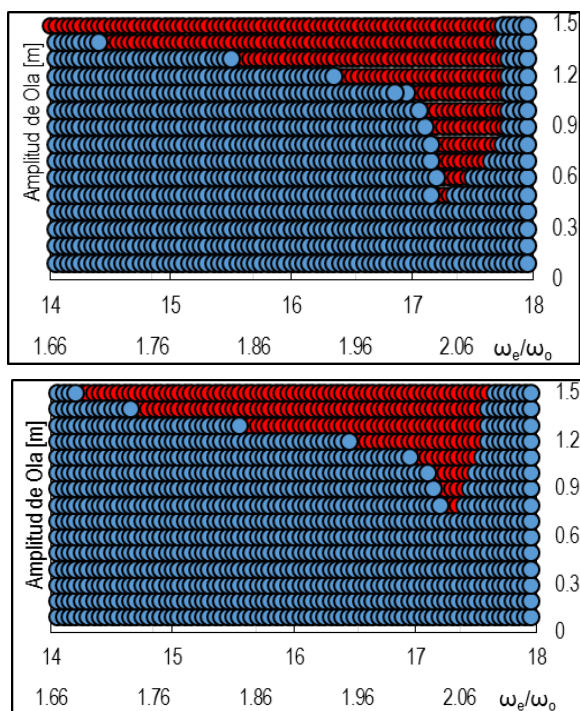


Fig. 10. Resumen de simulación sin y con amortiguamiento del 2.5%, Condición de carga 1

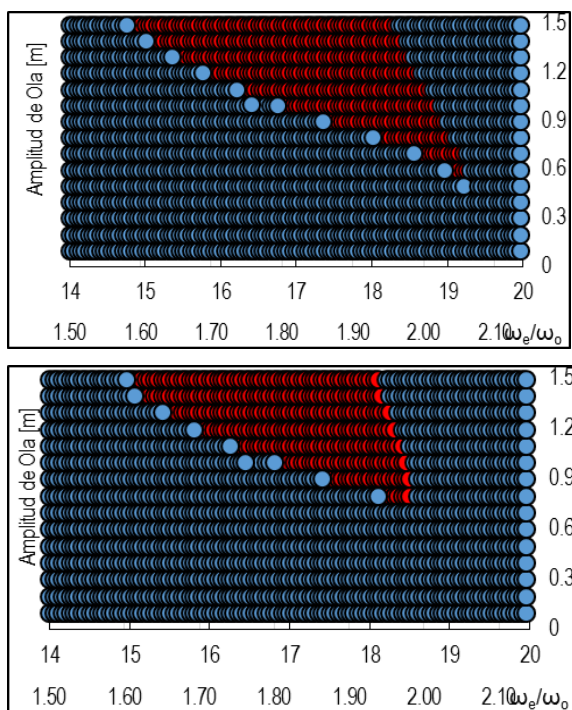


Fig. 11. Resumen de simulación sin y con amortiguamiento del 2.5%, Condición de carga 2

### C. Simulaciones en mar irregular

Dado que las condiciones de mar que se reportaron al momento del accidente fueron de estado 4, se generó el espectro correspondiente a dicha situación, empleando la formulación de Bretschneider, con 0.71 1/seg y 1.90 m, para la frecuencia modal y la altura significativa, respectivamente. Se emplearon 200 armónicos para la descomposición del estado de mar, y el mismo número de puntos para representar la superficie irregular resultante. En este caso, dado que no hay una ola regular, la velocidad a la que debe avanzar el buque para encontrar las olas a la frecuencia crítica principal (2 veces la natural), no puede precisarse. Por ello se estimó una velocidad promedio de avance de las olas, empleando la frecuencia modal y la velocidad del buque se tomó como la diferencia entre la velocidad crítica y la de las olas.

Las simulaciones de la respuesta en mar irregular se llevaron hasta los 1800 segundos, ó 30 minutos. Se encontró que para el caso en que no se incluye amortiguamiento, la resonancia paramétrica se presenta y se manifiesta con un incremento en el ángulo de Balance, pero no es capaz de llevar al buque a la zozobra. Una vez que se incluye una pequeña cantidad de amortiguamiento, la oscilación tiende a decrecer. En las Figuras 12 y 13 se comparan las respuestas para el caso sin y con amortiguamiento del 1% respecto del crítico, notándose los comportamientos descritos previamente.

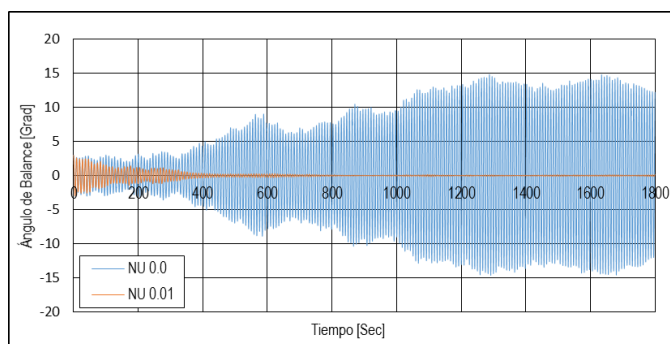


Fig. 12. Balance en estado de Mar 4, condición de carga 1, sin y con 1% de amortiguamiento

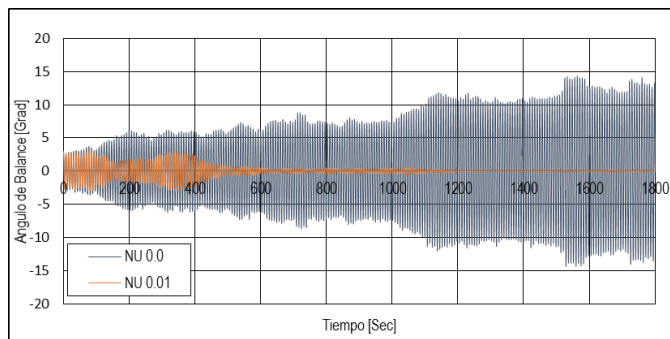


Fig. 13. Balance en estado de Mar 4, condición carga 2, sin y con 1% de amortiguamiento



A continuación en la Fig. 14 se presenta la variación del brazo adrizante vs el ángulo de Balance, en las dos condiciones de carga. Se nota la separación respecto del comportamiento lineal.

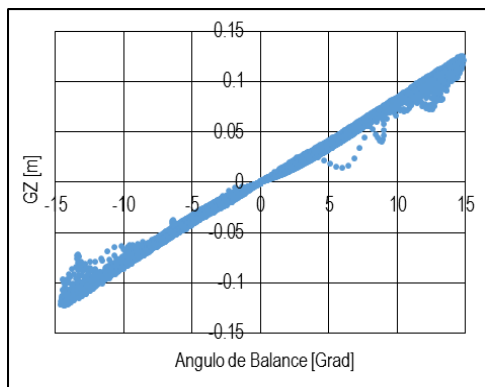
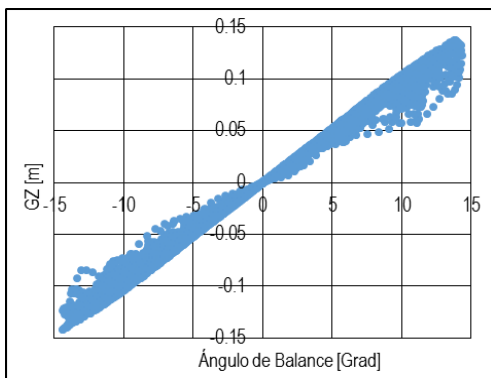


Fig. 14. Variación del brazo adrizante en función del ángulo de Balance para condiciones de carga 1 y 2

En la Fig. 15 se presenta la variación de la amplitud de la ola equivalente de Grim vs tiempo.

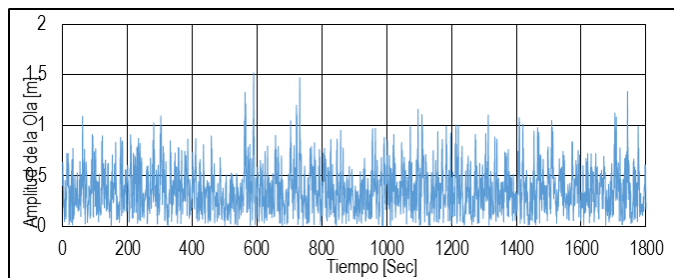


Fig. 15. Variación de la amplitud de la ola equivalente en estado de Mar 4

A continuación en la Fig. 16 se presenta un histograma con la distribución de las amplitudes, que sigue muy cercanamente la distribución de Rayleigh, con media cuadrada de  $0.10 \text{ m}^2$ .

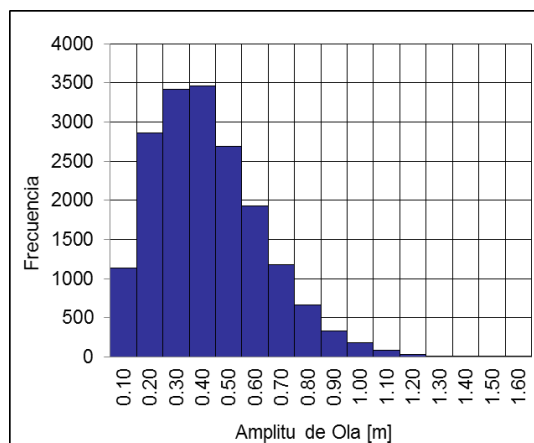


Fig. 16. Distribución de la amplitud de la ola equivalente en estado de Mar 4, para  $\lambda_w = 37.83 \text{ m}$

#### IV. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se describe el fenómeno del Balance Paramétrico de un buque y luego se implementó el método de Runge Kutta de cuarto orden, para aproximar la solución de la ecuación desacoplada de movimiento de Balance Paramétrico, en mar regular e irregular, empleando el artificio matemático de ola equivalente de Grim mejorada. Finalmente se realizan varias simulaciones para un buque nacional tipo atunero, en dos condiciones de carga diferentes y se analiza la posibilidad de zozobra por Resonancia Paramétrica.

La resonancia paramétrica es un fenómeno de inestabilidad dinámica, que se desarrolla principalmente cuando la frecuencia de excitación es dos veces la frecuencia natural del buque en balance. Esto se debe a que el término restaurador de la ecuación de movimiento que representa la excitación paramétrica, sufre una variación en función del perfil de la ola. En el caso del buque, la variación del plano de flotación por efecto de la ola representa el armónico de excitación paramétrico.

El método de Runge Kutta de cuarto orden, sirvió para desarrollar la integración en tiempo de la ecuación de movimiento de Balance Paramétrico de un buque pesquero ecuatoriano. Empleando artificios matemáticos como el método de Grim para una representación equivalente del mar irregular, se logra estimar el valor del brazo adrizante en función de la amplitud, posición relativa del seno de la ola y el ángulo de balance. Las zonas de inestabilidad encontradas en olas regulares, en las dos condiciones de carga analizadas, son consistentes con el comportamiento de la ecuación de Mathieu.

El término de amortiguamiento en el Balance Paramétrico es de vital importancia en el análisis. En el caso de la respuesta

en olas regulares, reduce significativamente las regiones de inestabilidad. Mientras que en el caso de mar irregular, la razón de disipación de energía provocado por el amortiguamiento es mayor que la razón de aumento de energía provocado por la excitación paramétrica. Por esta razón se considera la magnitud del amortiguamiento como un factor clave para la seguridad del buque, en los Criterios de Estabilidad de Segunda Generación.

Es posible que el buque pesquero ecuatoriano analizado sufra Resonancia Paramétrica, en olas regulares cuando las encuentra a la frecuencia crítica, doble de la natural. Cuando se llega a una situación resonante, en cada oscilación se agrega más energía al movimiento, aumentando la amplitud del balance que puede provocar la zozobra del buque.

Finalmente, en función de los resultados obtenidos, es poco probable que el buque pesquero ecuatoriano analizado en este trabajo, bajo las condiciones de operación asumidas y en olas irregulares con estado de mar 4 haya sufrido una resonancia paramétrica con elevadas amplitudes. Esto se debe a la disipación de energía por efectos del amortiguamiento, y a que las olas en un mar irregular tienen una velocidad que sigue una función de densidad probabilística, lo cual dificulta una sincronización entre la frecuencia de encuentro y la natural para que se produzca la zozobra.

#### AGRADECIMIENTO

La colaboración de la Subsecretaría de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial, proveyendo la información técnica de la embarcación analizada, debe ser reconocida.

#### REFERENCES

- [1] IMO, "International Code on Intact Stability, 2008". International Maritime Organization, London, 2009
- [2] V. Belenky, C. Bassler, & K. Spyrou, "Development of Second Generation Intact Stability Criteria". Naval Surface Warfare Center, NSWCCD-50-TR-2011/065, 2011
- [3] M. Sotelo, "Simulación Numérica de problemas de estabilidad debido a balance paramétrico, en buques pesqueros ecuatorianos". Proyecto de Graduación en Ingeniería Naval, Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar, ESPOL, 2015
- [4] J. C. F. Polo & M. A. S. Neves., "Desarrollos recientes de nuevos criterios de estabilidad intacta de buques en olas. I Simposio Panamericano de Ingeniería Naval, Transporte Marítimo e Ingeniería Portuaria, Lima, Perú, 2013
- [5] G. Bulian, "On an improved Grim effective wave". DINMA, University of Trieste, Trieste, Italy 2008
- [6] Y. Himeno, "Prediction of Ship Roll Damping – State of the Art. The NAME Department, Publication No 239, U. of Michigan, 1981
- [7] R. Beck, W. Cummins, J. Dalzell, P. Mandel & W. Webster, "Motion in Waves, Capítulo VIII en "Principles of Naval Architecture", Vol. III, SNAME, 1988
- [8] W. Press, W. Vetterling, & B. Flannery, "Numerical Recipes". Cambridge University Press, 1992
- [9] J. Pinto, "Coeficiente de amortiguamiento experimental en balance con velocidad de avance del modelo de un buque pesquero ecuatoriano".