

C16

MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN TURBOFERRY

Borja Sepúlveda Martínez
Departamento de Dispositivos Sensores y Biosensores
Instituto de Microelectrónica de Madrid
CSIC

Segundo Esteban San Román
Departamento de Arquitectura de
Computadores y Automática
Fac. Ciencias Físicas. UCM.

Luis Grau Fernández
Departamento de Informática y Automática
Facultad de Ciencias. UNED

Resumen

Se han construido unas librerías, mediante las cuales es posible simular el comportamiento tanto en reposo como en marcha, de un ferry de alta velocidad. Además, mediante los diversos elementos desarrollados, es posible modelar y simular un gran abanico de los tipos de buques existentes hoy en día independientemente de la geometría de su casco.

Palabras Clave: Simulación, EcosimPro, modelado de sistemas físicos orientado a objetos, modelado de vehículos marinos.

1 INTRODUCCIÓN

El propósito de este artículo, es mostrar un conjunto de librerías, desarrolladas en Ecosim, mediante las cuales es posible modelar buques de superficie bajo diversas condiciones de operación.

Dicho trabajo viene promovido por los objetivos fijados en un proyecto concedido a los Departamentos de Informática y Automática (DIA) de la UNED, de Arquitectura de Computadores y Automática de la UCM y de Tecnología Electrónica, Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Cantabria.

El primero de estos proyectos, denominado Control Robusto e Inteligente de Buques de Alta Velocidad (TAP97-0607-C03).

El proyecto tiene como objetivo investigar las posibilidades y ventajas del uso de las técnicas de control robusto y de control inteligente en el diseño de sistemas de control para buques de alta velocidad.

Estos métodos tienen la ventaja de que se han desarrollado específicamente para garantizar niveles mínimos de estabilidad y de prestaciones ante la presencia de perturbaciones del sistema y de incertidumbres en el modelo de diseño.

Para ello se ha definido un problema de control para un buque de alta velocidad de interés para las compañías fabricantes de buques que actúan como EPOs. Este problema consiste en el amortiguamiento de las aceleraciones verticales causantes del mareo. En la solución del problema se utilizan diversas técnicas de control clásico, control robusto, control inteligente y posibles combinaciones. La robustez de todas las soluciones son evaluadas y se comparan los resultados obtenidos por los distintos métodos usados en la solución del problema. Aquel o Aquellos controladores que resulten más adecuados se implementarán en un modelo a escala para realizar ensayos de comportamiento en la mar. Para llevar a cabo el diseño, la evaluación y verificación de los resultados se han desarrollado modelos no lineales para la dinámica del buque y para las perturbaciones.

Estos han sido algunos de los motivos que han impulsado al equipo investigador, a realizar un modelo físico utilizando Ecosim, que pueda servir como banco de pruebas para testear el comportamiento del buque sometido a diversas estrategias de control y ante diferentes tipos de mares. Antes de comentar las particularidades de la librería creada, se van a exponer algunos de los detalles del modelo matemático utilizado.

2 MODELO DEL SÓLIDO RÍGIDO

Se considerará a un buque como un sólido rígido con seis grados de libertad y por tanto con seis diferentes componentes de movimiento definidas como *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* y *yaw*, tal y como puede apreciarse en la figura 1.

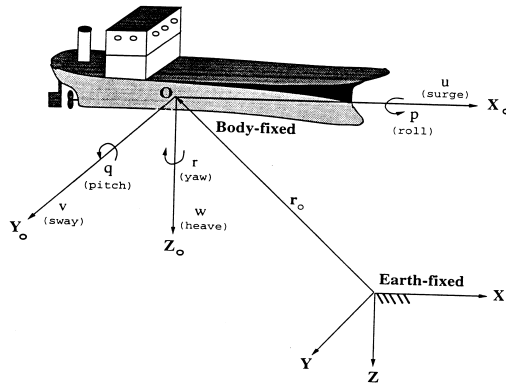


Figura 1: Componentes y ejes de un buque.

2.1 SISTEMAS DE COORDENADAS

Cuando se analiza el movimiento de un vehículo marino con seis grados de libertad, es conveniente definir dos sistemas de coordenadas como se indica en la figura 1. El sistemas de coordenadas en movimiento $X_0Y_0Z_0$ se toma fijo al vehículo y denomina habitualmente *Marco de Referencia Fijado al Cuerpo* (MRFC). El origen O del MRFC, se elige normalmente, de manera que coincida con el centro de gravedad (CG) cuando este se encuentra en el plano principal de simetría, o en algún otro punto más conveniente si este no es el caso. En el caso de un barco, el origen de coordenadas se sitúa en la mitad del barco en longitud y anchura y a la altura del agua en reposo.

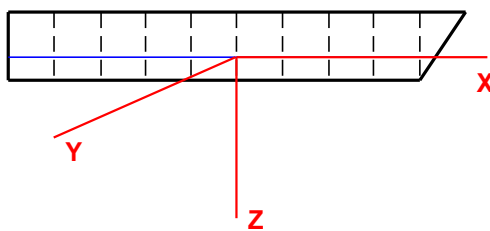


Figura 2: Elección del origen de coordenadas.

Para vehículos marinos, los ejes $X_0Y_0Z_0$ se eligen de manera que coincidan con los ejes principales de inercia.

El movimiento del MRFC, se expresa en función de un sistema de referencia inercial. Para vehículos marinos, es usual asumir que las aceleraciones de un punto sobre la superficie de la tierra, pueden ser despreciadas. De hecho, esta es una buena aproximación debido a que el movimiento de la tierra, raramente afecta a los buques. En función de

esto, el sistema de referencia X,Y,Z puede ser considerado inercial. (MI)

Esto último sugiere que es conveniente referenciar la posición y orientación del vehículo al sistema inercial (MI) mientras que las velocidades angulares y lineales serán expresadas con respecto al sistema de coordenadas fijo al móvil (MRFC).

Las diferentes cantidades se definen de acuerdo a la notación SNAME (1950) de acuerdo a la cual, el movimiento de un vehículo marino con seis grados de libertad puede ser descrito por los siguientes vectores:

$$\mathbf{h} = [\mathbf{h}_1^T, \mathbf{h}_2^T]^T; \mathbf{h}_1 = [x, y, z]^T; \mathbf{h}_2 = [\mathbf{f}, \mathbf{q}, \mathbf{y}]^T$$

$$\mathbf{u} = [\mathbf{u}_1^T, \mathbf{u}_2^T]^T; \mathbf{u}_1 = [u, v, w]^T; \mathbf{u}_2 = [p, q, r]^T$$

$$\mathbf{t} = [\mathbf{t}_1^T, \mathbf{t}_2^T]^T; \mathbf{t}_1 = [X, Y, Z]^T; \mathbf{t}_2 = [K, M, N]^T$$

donde \mathbf{h} es el vector que denota la posición y orientación del móvil con respecto a MI, \mathbf{u} el vector velocidad lineal y angular referido a MFRC y \mathbf{t} el vector que describe las fuerzas y los momentos referidos también a MFRC.

Para la orientación del barco en el sistema de ejes tierra se utilizan los ángulos de Euler. Los ángulos de Euler poseen el problema de que la transformación de las velocidades angulares en el sistema de referencia móvil a las derivadas temporales de los ángulos de Euler en ejes tierra, posee singularidad para $\theta = 90^\circ$. Sin embargo la integración de las ecuaciones consigue pasar por esta singularidad sin problemas, además, en la práctica, el buque no se va a aproximar en ningún caso a estos límites. En cualquier caso, para asegurar que la integración era correcta, se ha introducido el modelo a través de los cuaterniones, que no poseen singularidad y se ha comprobado que el resultado es el mismo. Se deja la posibilidad de integrar con ángulos de Euler o cuaterniones porque con éstos últimos la integración es más rápida. Como el significado de éstos es menos intuitivo, tras la integración, se realiza una transformación a ángulos de Euler.

El paso del sistema de **ejes móvil** a **ejes tierra**, a través de los ángulos de Euler se realiza con la siguiente matriz:

$$\bar{C} = \begin{pmatrix} \cos y \cdot \cos q & -\sin y \cdot \cos f + \cos y \cdot \sin q \cdot \sin f & \sin y \cdot \sin f + \cos y \cdot \cos f \cdot \sin q \\ \sin y \cdot \cos q & \cos y \cdot \cos f + \sin f \cdot \sin q \cdot \sin y & -\cos y \cdot \sin f + \sin q \cdot \sin y \cdot \cos f \\ -\sin q & \cos q \cdot \sin f & \cos q \cdot \cos f \end{pmatrix}$$

Para hacer la transformación inversa hay que utilizar la inversa de esta matriz que en este caso, coincide con su traspuesta.

Los datos del tensor de inercia están dados inicialmente respecto al CG del barco. Como las

ecuaciones dinámicas utilizadas están referidas al sistema de referencia de *ejes móvil*, tenemos que introducir las componente del tensor de inercia respecto al origen de coordenadas de este sistema.

Teniendo en cuenta lo anterior, aplicando mecánica lagrangiana, y desarrollando las ecuaciones matriciales, se obtienen las fórmulas que regirán el comportamiento del sólido rígido

$$\begin{aligned} m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= X \\ m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= Y \\ m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] &= Z \\ I_x \dot{p} + (I_x - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] &= K \\ I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= M \\ I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] &= N \end{aligned}$$

3 COMPROBACIÓN DEL MODELO DEL SÓLIDO RÍGIDO

En primer lugar se prueban las respuestas del sólido rígido sin peso ni empuje. Imponemos unas velocidades angulares que tengan una dirección paralela a cada uno de los ejes principales, es decir, velocidades angulares iniciales que sólo tengan componente p , q , o r para así comprobar que la velocidad angular del sólido es paralela a la inicial.

Velocidad angular $p = 0.5 \text{ rad/s}$.

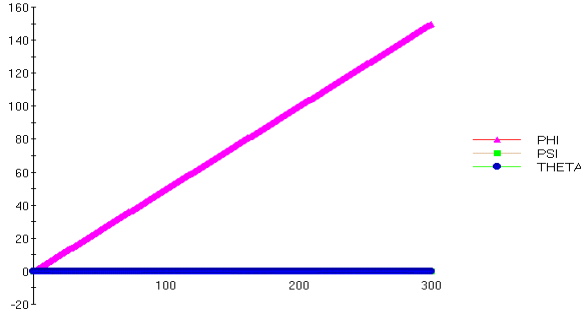


Figura 3: comprobación de las ecuaciones del SR

Velocidad angular $p = 0.5 \text{ rad/s}$.

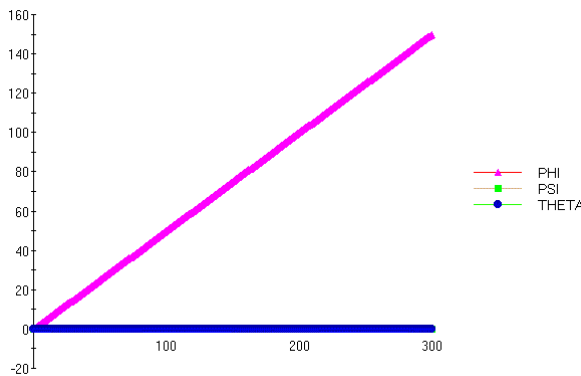


Figura 4: Comprobación de las ecuaciones del SR

Se observa que sólo hay variación del ángulo correspondiente a la velocidad angular aplicada, es decir $p \Rightarrow \phi$, $q \Rightarrow \theta$ y $r \Rightarrow \psi$, y que esta el lineal, como cabría esperar.

Otra prueba para comprobar el buen comportamiento del sólido rígido es la de lanzarlo con cierta velocidad inicial, u , v o w , y con cierta velocidad angular p , q o r . Se tiene que cumplir que el centro de gravedad del sistema se mueve con velocidad constante en el sistema de ejes tierra, pues no está actuando sobre él ninguna fuerza.

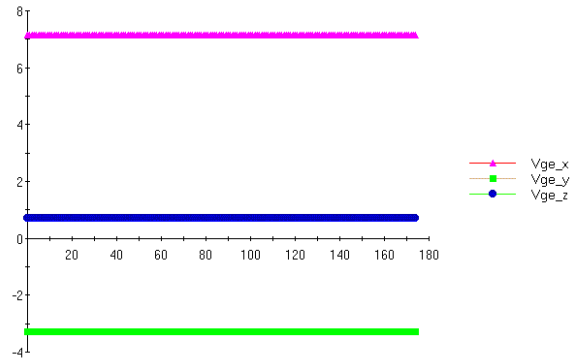


Figura 5: Prueba del SR

Para calcular la velocidad del centro de gravedad se ha hecho uso de:

$$\bar{v}_{cg} = \bar{v}_o + \bar{\omega} \times \bar{r}_{cg}$$

Efectivamente, se cumple que las componentes de la velocidad del CG del sólido rígido permanecen constantes y, por lo tanto, su velocidad total.

Todos estos resultados coinciden con los obtenidos mediante la integración de los cuaterniones, en vez de la de los ángulos de Euler.

4 FUERZAS DE RECUPERACIÓN: PESO Y EMPUJE

En el barco van a actuar dos fuerzas estáticas, el peso y el empuje. Estáticas en cuanto a que están presentes aunque el barco se encuentre en reposo. El empuje como veremos va a cambiar con los movimientos del barco debido a la aparición de fuerzas y momentos causados por las olas presentes en el mar.

El **peso** es la fuerza debida a la masa del barco. Esta, va a tener su punto de aplicación en el centro de gravedad (CG) del buque que, como hemos dicho, se encuentra en el punto $(-13.39, 0, -5.2)$, coordenadas medidas en el SI (m). Este punto es fijo ya que el barco es un sólido rígido y la masa del mismo permanece constante. Esta fuerza, tiene la siguiente forma en ejes tierra:

$$\bar{W} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{pmatrix}$$

El signo positivo es debido a que se ha tomado el sentido positivo del eje Z hacia abajo

El **empuje** es la fuerza de sustentación del barco y la que hace que este flote. Está basada en el principio de Arquímedes y, por ello, en el volumen desalojado (VD) por el barco. El punto de aplicación es el centro de flotación (CF) el cual, al contrario del de gravedad, no es un punto fijo pues el movimiento del barco va a suponer que el volumen de agua desalojado sea distinto en unas partes que en otras y por ello, el centro de flotación se va a ir desplazando.

Así, si se sumerge una parte del casco del barco, el VD total del barco aumenta y eso provoca que el CF se desplace hacia arriba. Si giramos el barco un cierto ángulo $\theta > 0$, el VD en la parte delantera del barco será mayor que en la trasera y el CF se desplazará hacia ese lado.

La forma de la fuerza de empuje es:

$$\bar{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\mathbf{r} \cdot \mathbf{g} \cdot VD \end{pmatrix}$$

El hecho de que el CF sea móvil es lo que provoca que se generen momentos que tienden a llevar al barco a su posición de equilibrio. Esto se ilustrará en las simulaciones del modelo.

Para modelar el barco con las fuerzas hidrostáticas e hidrodinámicas se ha creado el componente *Alhambra* que va a heredar del componente *rigid_body* el comportamiento de sólido rígido con sus ecuaciones correspondientes.

LIBRARY ALHAMBRA
USE MATH

```
COMPONENT alhambra_def IS_A rigid_body
(
    INTEGER n=10 "número de nodos"
)
```

Para modelar el paso de la ola a lo largo del barco, se ha dividido éste en bloques o cuadernas y, en cada una de ellas, se calcula el VD y la posición del CF. En principio el barco está dividido en 10 bloques, cada uno de los cuales mide 12 metros de largo.

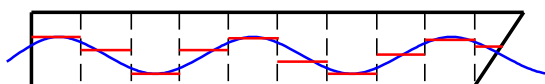


Figura 6: División del buque en cuadernas

Para conseguir que el modelo fuera más exacto se podría dividir en bloques más pequeños sin embargo, como las longitudes de onda de las olas van a estar comprendidas entre los 60 y los 1000 m, la

aproximación de considerar que la altura del agua en cada bloque se mantiene constante no es mala.

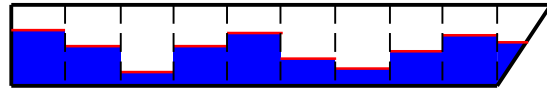


Figura 7: Aproximación

Un consecuencia de esta aproximación es que el VD por cada cuaderna sólo va a depender de una coordenada, la coordenada Z de cada cuaderna en ejes tierra. Para calcular el VD de cada bloque vamos a utilizar la variable $H_total[j]$. Esta variable nos da la distancia desde la línea del agua al fondo del barco.

Calculando el empuje que hay en cada bloque como consecuencia del VD por el mismo y calculando la fuerza y el momento totales como suma de las fuerzas y momentos de cada cuaderna, se obtiene el modelo de bloques.

5 DIVISIONES DEL BARCO

En ambos modelos necesitamos que el barco esté dividido en bloques. Como ya hemos dicho, lo hemos dividido en 10 partes de idéntica longitud (12 m). LaS coordenadas del centro de cada bloque van a venir dadaS por:

$$\bar{r}_{node}[j] = \begin{pmatrix} X_{node}[j] \\ Y_{node}[j] \\ Z_{node}[j] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{LOA}{2} - \frac{2j-1}{2} \cdot \frac{LOA}{n} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$j = 1, \dots, n$

Siendo $LOA = 120 \text{ m}$ la longitud total del barco y $n = 10$ el número de divisiones del barco.

Para hacer las divisiones se ha utilizado los planos de un modelo de *Alhambra* ligeramente distinto del que se pretende el estudio (algo mayor). Además se han aproximado las superficies del casco en cada bloque por planos.

Cuaderna 1

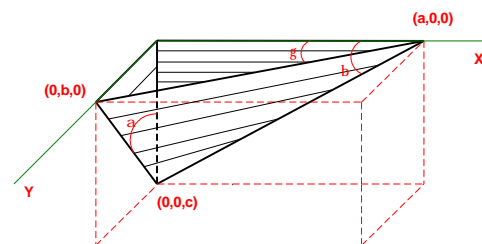


Figura 8: Cuaderna 1

Cuadernas 2 a 7

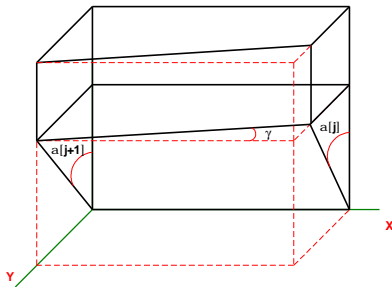


Figura 9: Cuadernas 2 a 7

Cuadernas 8 a 10

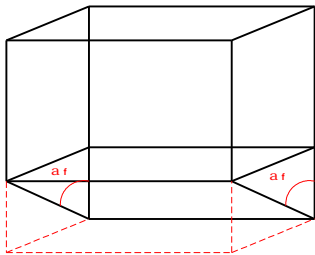


Figura 10: Cuadernas 8 a 10

6 VOLUMENES DE CADA CUADERNA

Teniendo en cuenta la división que se ha hecho, los volúmenes desalojados de cada bloque, en función de la distancia del plano del agua al fondo del barco, son:

Volumen cuaderna 1:

$$VD[1] = \iiint_{VD[1]} dV = \int_0^z dz \int_0^{\frac{z}{\operatorname{tg} b}} dx \int_0^{z \operatorname{tg} a - x \operatorname{tg} b} dy$$

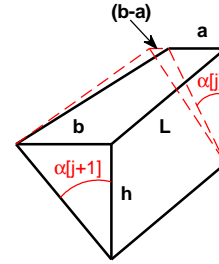
$$VD[1] = \frac{\operatorname{tg} a[1]}{3 \operatorname{tg} b} \cdot (H_{total}[1])^3$$

Considerando que $z = H_{total}[1]$ es el distancia desde el plano del agua al fondo del barco. Los ángulos α y β son los que aparecen en la figura de la cuaderna 1.

Volúmenes de las Cuadernas 2 a 7:

En el volumen de estas cuadernas tenemos dos partes diferenciadas:

Para $H_{total}[j] < H_{c3} = 6.2 \text{ m}$. Casco triangular que se afina hacia proa.



$$a = h \operatorname{tg} \alpha[j]; \quad b = h \operatorname{tg} \alpha[j+1]$$

Figura 11: Volumen de cuaderna

Por tanto, el volumen de este bloque será:

$$V = \frac{1}{2} \cdot \int_0^L h \cdot \left(b - \frac{b-a}{L} \cdot x \right) \cdot dx$$

$$V = \frac{1}{4} \cdot h \cdot L \cdot (b+a) \Rightarrow \text{Sustituyendo } a \text{ y } b \text{ por}$$

sus respectivos valores tenemos que el volumen para las cuadernas 2 a 5 viene dado por:

$$VD[j] = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{LOA}{n} \right) \cdot (\operatorname{tg}[j+i] + \operatorname{tg}[j]) \cdot H_{total}[j]^2$$

Tenemos una dependencia cuadrática con $H_{total}[j]$, que es la distancia entre la superficie del agua y el fondo del buque.

Para el caso $H_{total}[j] < H_{c3}$. Casco paralelepípedo que se afina hacia proa

En este caso tenemos la parte de abajo completamente sumergida. El volumen de la parte superior sumergido vendrá dado por:

$$VD_{Ata}[j] = \left(\frac{LOA}{n} \right) \cdot H_{c3} \cdot (\operatorname{tg} a[j+1] + \operatorname{tg} a[j]) \cdot (H_{total}[j] - H_{c3})$$

Si le sumamos el volumen sumergido de la parte de abajo, nos queda que, el VD total será:

$$VD[j] = \left(\frac{LOA}{n} \right) \cdot H_{c3} \cdot (\operatorname{tg} a[j+1] + \operatorname{tg} a[j]) \cdot \left(H_{total}[j] - \frac{1}{2} \cdot H_{c3} \right)$$

Volumen Cuadernas 8 a 10

$H_{total}[j] < H_r = 3$. Casco triangular.

$$VD[j] = \left(\frac{LOA}{n} \right) \cdot H_r \cdot \operatorname{tg} a_f \cdot H_{total}[j]^2$$

$H_{total}[j] > H_r$. Casco paralelepípedo.

Considerando la parte baja completamente sumergida.

$$VD [j] = \left(\frac{LOA}{n} \right) \cdot H_{c3} \cdot \operatorname{tg} a_f \cdot (2 \cdot H_{total} [j] - H_r)$$

$$Z_B [1] = - \left(\frac{3}{4} \cdot H_{total} [1] - H_0 \right)$$

7 CENTROS DE FLOTACIÓN DE LAS CUADERNAS

El centro de flotación de cada bloque va a venir dado por:

$$\bar{R}_B [j] = \frac{\iiint_{VD[j]} \bar{r} \cdot dV}{\iiint_{VD[j]} dV}$$

El VD por cada bloque sólo depende de la coordenada Z (o $H_{total}[j]$) tenemos que las coordenadas del centro de flotación de cada bloque son:

$$X_B [j] = X_{node} [j]$$

$$Y_B [j] = 0$$

$$Z_B [j] = \frac{\iiint_{VD[j]} z \cdot dV}{\iiint_{VD[j]} dV}$$

Coordenada del Z CF de Cuaderna 1

Teniendo en cuenta la forma del volumen y su dependencia única en $H_{total}[j]$:

$$dV = \frac{\operatorname{tg} a [1]}{\operatorname{tg} b} \cdot z^2 \cdot dz$$

$$H_B [1] = \frac{\int \left(\frac{\operatorname{tg} a [1]}{\operatorname{tg} b} \right) \cdot z^3 \cdot dz}{\left(\frac{\operatorname{tg} a [1]}{3 \cdot \operatorname{tg} b} \right) \cdot z^3}$$

Hacemos la integración sobre $z = H_{total}[j]$, es decir sobre la distancia entre la línea del agua y el fondo del barco. El resultado que obtenemos nos da la distancia entre el CF y el fondo del barco. Para pasarlo a nuestro sistema de referencia con eje Z hacia abajo y con origen en el centro del barco a la altura del agua en el equilibrio H_0 , restamos al resultado de la integral H_0 y cambiamos de signo.

$$Z_B [1] = - (H_B [1] - H_0)$$

Por tanto, la coordenada Z del CF de la cuaderna 1 es:

Coordenada Z del CF de Cuadernas 2 a 7:

Se sigue el mismo procedimiento que para la cuaderna 1, la diferencia es que ahora tenemos dos partes diferenciadas.

$$H_{total}[j] < H_{c3} :$$

$$Z_B [j] = - \left(\frac{2}{3} \cdot H_{total} [j] - H_0 \right)$$

$$H_{total}[j] > H_{c3} :$$

La altura del centro de flotación, teniendo en cuenta que la parte baja está completamente sumergida:

$$H_{BA} [j] = \frac{1}{2} \cdot (H_{total} [j] - H_{c3})$$

Si se sumamos la altura correspondiente a tener la parte baja sumergida:

$$H_{BB} [j] = \frac{2}{3} \cdot H_{c3}$$

Y llevamos a nuestro sistema de coordenada

$$Z_B [j] = - \left(\frac{1}{2} \cdot H_{total} [j] + \frac{1}{6} \cdot H_{c3} - H_0 \right)$$

Coordenada Z del CF de Cuadernas 8 a 10:

$$H_{total}[j] < H_r :$$

$$Z_B [j] = - \left(\frac{2}{3} \cdot H_{total} [j] - H_0 \right)$$

$$H_{total}[j] > H_r :$$

$$Z_B [j] = - \left(\frac{1}{2} \cdot H_{total} [j] + \frac{1}{6} \cdot H_r - H_0 \right)$$

7 MODELO CON CENTRO DE FLOTACIÓN MOVIL

En este modelo hay que calcular el CF global del barco a partir de los CF de cada cuaderna. Las componentes del mismo vendrán dadas por las siguientes expresiones:

$$X_B = \frac{\sum_{j=1}^n X_B [j] \cdot VD [j]}{VD_t} = \frac{1}{VD_t} \sum_{j=1}^n X_{node} [j] \cdot VD [j]$$

$$Y_B = 0$$

$$Z_B = \frac{1}{VDt} \sum_{j=1}^n Z_B[j] \cdot VD[j]$$

De esta manera, como ya hemos comentado, tenemos el peso total que actúa en el CG del buque y que es constante, y un empuje total que actuará en CF móvil. Como el movimiento del barco va a provocar que ambas fuerzas tengan distintos puntos de aplicación se van a generar pares de fuerzas que van a tender a llevar al barco a la posición de equilibrio.

La fuerza total va a ser :

$$\overline{F}_{int} = \overline{Bt} + \overline{Wt}$$

El empuje y el peso los pasamos previamente a ejes móvil mediante una transformación de coordenadas.

El empuje total es:

$$\overline{Bt} = \sum_{j=1}^n \overline{B[j]}$$

Los momentos totales que se generan son (a partir del peso y el empuje totales):

$$\overline{M} = (\overline{R_G} \times \overline{Wt}) + (\overline{R_B} \times \overline{Bt})$$

8 MODELO DE BLOQUES

En vez de calcular el CF global del barco, lo se hace es calcular la fuerza debida al empuje en cada cuaderna y seguidamente, calcular el momento que genera. En cuanto al peso tenemos, igual que antes, una fuerza actuando en el CG del barco.

La fuerza total va a ser la misma que en el caso del Modelo con CG Móvil.

$$\overline{F}_{int} = \overline{Bt} + \overline{Wt}$$

El momento generado por el empuje en cada bloque va a ser:

$$\overline{Mb}[j] = \overline{R_B}[j] \times \overline{B_m}[j]$$

El momento total debido al empuje y el peso será:

$$\overline{Mt}_m = \overline{R_G} \times \overline{Wt} + \sum_{j=1}^n \overline{R_B}[j] \times \overline{B_m}[j] = \overline{M}_{int}$$

Todas las fuerzas y momentos calculados en ejes móvil.

10 MODELO DEL MAR

Las olas que vamos a estudiar son olas regulares, es decir, de forma sinusoidal. Por ello, vamos a tener fuerzas en cada trozo diferenciadas entre sí por la fase, como consecuencia de la distinta posición y, por tanto, el distinto tiempo de llegada. Estas fuerzas van a producir distintos momentos por encontrarse en distintas partes del barco.

Como las olas van a ser regulares, su altura en ejes tierra en cada una de las cuadernas va a venir dada por:

$$Z_{wave}[j] = Amp \cdot \text{sen} \left(\frac{2p}{I} \cdot X_{node}[j] - w_{enc} \cdot t \right)$$

La **frecuencia** que observa el barco cuando se mueve con cierta velocidad u de avance no es la frecuencia de las olas w_0 , sino la frecuencia de encuentro w_{enc} . La relación entre una y otra viene dada por:

$$w_{enc} = w_0 - \frac{w_0^2 \cdot u}{g} \cdot \cos m$$

El ángulo m es el ángulo en el que llegan las olas respecto al barco. En nuestro estudio m es 180°, es decir, las olas van en la misma dirección del barco, pero en sentido contrario.

La **velocidad de las olas** c para un mar de aguas profundas viene dada por

$$c = \sqrt{\frac{g \cdot I}{2 \cdot p}}$$

Es decir, la velocidad de la ola depende de la longitud de onda de la misma. Para las olas grandes $\Rightarrow I$ grande, tenemos velocidades mayores.

Como:

$$I = \frac{2 \cdot p \cdot g}{w_0}$$

podemos poner la frecuencia de encuentro de la siguiente manera:

$$w_{enc} = \frac{2 \cdot p}{I} \cdot (c + u)$$

Para evitar el empezar en una situación muy alejada del equilibrio, sobre todo para olas de amplitud muy grande, lo que se hace es que la perturbación sea 0 (altura de la ola $Z_{wave}[j] = 0$) para tiempos menores que un tiempo de retraso para cada cuaderna. Este tiempo de retraso es el tiempo que tarda en llegar la ola desde la primera cuaderna hasta la j-ésima.

$$Z_{wave}[j] = 0 \Leftrightarrow TIME < retraso[j]$$

$$retraso[j] = \frac{X_{node}[1] - X_{node}[j]}{\left(\frac{I \cdot w_{enc}}{2 \cdot p} \right)}$$

Para calcular el empuje en cada cuaderna hacemos uso de $H_{total}[j]$, la distancia entre el agua y el fondo del barco. Cuando tenemos olas, esta distancia vendrá dada por:

$$H_{total}[j] = Z_{wave}[j] + He_{node}$$

Donde

$$He_{node}[j] = Z_0 + \left[\overline{C} \cdot \begin{pmatrix} X_{node}[j] \\ Y_{node}[j] \\ Z_{node}[j] \end{pmatrix} \right]_z$$

Es decir, coordenada Z de la posición inicial del barco en ejes tierra más la posición de la coordenada Z de cada una de las cuadernas en ejes tierra.

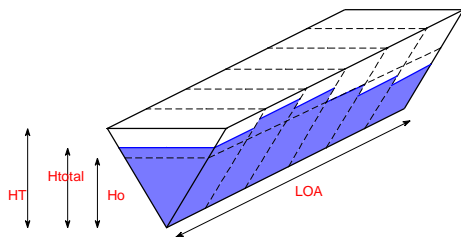


Figura 12: Modelo del mar

11 FUERZAS HIDRODINAMICAS

En el buque, debido a la presencia del mar, van a aparecer una serie de fuerzas. Estas se pueden dividir en dos grupos: fuerzas hidrostáticas y fuerzas hidrodinámicas.

1. Las **fuerzas hidrostáticas** son las debidas al empuje, consecuencia del volumen desalojado del fluido. Estas ya han sido consideradas dentro del modelo de *floating frame* y *floating_frame_n*, junto al peso, lo que origina los movimientos de recuperación del barco que ya hemos estudiado.

2. Las **fuerzas hidrodinámicas**, son las que van a aparecer por la interacción del casco y el fluido cuando uno de los dos o ambos están en movimiento. Se pueden dividir en dos grupos:

a) **Fuerzas de difracción, F_j^D** : debido a la difracción o scattering de las ondas que inciden sobre el casco, o lo que es lo mismo, la rotura de la ola.

b) **Radiation Forces, F_j^R** : resultan de la radiación de ondas desde el barco cuando éste es forzado a oscilar en el modo k-ésimo en el agua en calma.

Se puede descomponer en dos partes:

i. Parte de la fuerza que está debida al movimiento forzado y que está en fase con la aceleración, o componente de **masa añadida**.

ii. Parte de la fuerza que está debida al movimiento forzado y que está en fase con la velocidad, parte de **amortiguamiento** o **damping**.

12 DESARROLLO EN ECOSIMPRO

Todos los conceptos anteriores, se han implementado utilizando EcosimPro como lenguaje de modelado. Para ello se han creado tres ficheros dentro de la librería ALHAMBRA, los cuales brevemente se van a comentar:

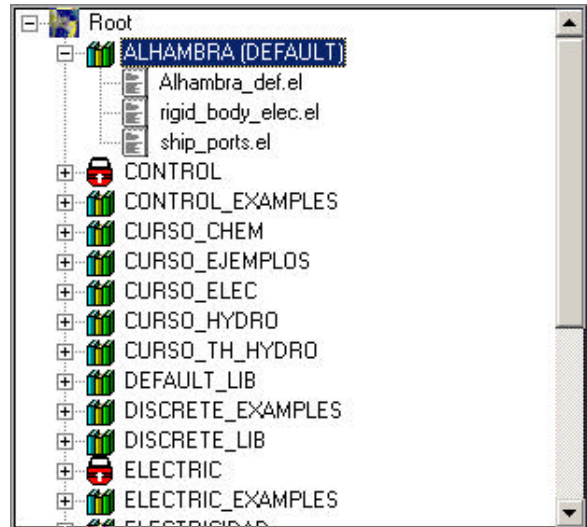


Figura 13: Librería ALHAMBRA

Ship_ports.el

Contiene la definición de los puertos utilizados por el resto de componentes.

LIBRARY ALHAMBRA

ENUM movil_axis = {x,y,z}

ENUM earth_axis = {Xo,Yo,Zo}

CONST REAL g = 9.807 "aceleración de la gravedad (m/s**2)"

PORT Forces

SUM REAL F[movil_axis]
SUM REAL M[movil_axis]

END PORT

PORT State

EQUAL REAL u
EQUAL REAL v "velocidades lineales"
EQUAL REAL w

EQUAL REAL p
EQUAL REAL q "velocidades angulares"
EQUAL REAL r

EQUAL REAL PHI
EQUAL REAL THETA "ángulos de Euler"
EQUAL REAL PSI

EQUAL REAL Xo
EQUAL REAL Yo "coordenadas en el sistema tierra"
EQUAL REAL Zo

EQUAL REAL VT "velocidad total"

END PORT

Rigid_body_elec.el

Contiene el modelo del componente *rigid_body* implementado mediante ángulos de Euler y

cuaterniones y posibilitando al usuario el uso de cualquiera de los dos métodos para realizar la integración.

```
-----
--
-- Componente sólido rígido con posibilidad de integración en
-- ángulos de Euler y en cuaterniones
--
-----
```

LIBRARY ALHAMBRA

USE MATH

COMPONENT rigid_body (BOOLEAN cuater = FALSE)

PORTS

IN Forces f_in
OUT State s_out

DATA

```
REAL g = 9.807 "aceleración de la gravedad (m/s**2)"
REAL m = 1.7707e6 "masa del buque (Kg)"

REAL lxx_g = 4.6872e7 "momento de inercia respecto al CG (Kg*m**2)"
REAL lxy_g = 0. "momento de inercia respecto al CG (Kg*m**2)"
REAL lxz_g = 0. "momento de inercia respecto al CG (Kg*m**2)"
REAL lyx_g = 0. "momento de inercia respecto al CG (Kg*m**2)"
REAL lyy_g = 1.3391e9 "momento de inercia respecto al CG (Kg*m**2)"
REAL lyz_g = 0. "momento de inercia respecto al CG (Kg*m**2)"
REAL lzx_g = 0. "momento de inercia respecto al CG (Kg*m**2)"
REAL lzy_g = 0. "momento de inercia respecto al CG (Kg*m**2)"
REAL lzz_g = 1.3744e9 "momento de inercia respecto al CG (Kg*m**2)"

REAL Xg = -13.9 "Coordenada X del centro de gravedad (m)"
REAL Yg = 0 "Coordenada Y del centro de gravedad (m)"
REAL Zg = -5.2 "Coordenada Z del centro de gravedad (m)"
```

Alambra_def.el

Este fichero, contiene el modelo global del buque utilizando cualquiera de los dos modelos de flotación anteriormente definidos.

Los valores de la masa añadida, al igual que otros parámetros, aparecen interpolados en forma de tablas y en función de la frecuencia. Dichos valores han sido obtenidos utilizando el programa PRECAL.

LIBRARY ALHAMBRA

USE MATH

COMPONENT alhambra_def IS_A rigid_body

```
(
    INTEGER n=10 "número de nodos"
)
```

DATA

```
REAL rho = 1025 "densidad del agua Kg/m**3)"
REAL LOA = 120 "Longitud del buque (m)"
REAL L3 = 112.5 "Longitud media del baroc en parte de fondo a tercera cubierta (m)"

--REAL alpha_deg[8] = {22.71, 37.09, 38.50, 44.67, 49.77, 53.70, 56.87, 58.46}
REAL alpha_deg[9] = {22.71, 37.09, 38.50, 44.67, 49.77, 53.70, 64.64, 67.17, 68.50}
REAL alpha_deg_f = 73.55

REAL gamma = 15.4 * PI/180 "ángulo del casco"
REAL beta = 43 * PI/180 "ángulo del casco en el primer nodo en dirección X"

REAL Amp = 3 "Amplitud de la onda sinusoidal (m)"
REAL w_o = 0.393 "frecuencia de encuentro (rad/s)"
REAL landa = 300 "Longitud de onda de la ola (m)"
REAL mu = PI "Ángulo de encuentro de la ola (rad)"
REAL U = 20 * 0.515 "Velocidad del barco en ejes tierra (m/s)"
REAL w_enc = 0.55 "Frecuencia de encuentro de las olas (rad/s)"

REAL H_c1 = 11.2 "Altura de la cubierta (m)"
REAL H_c3 = 6.2 "Altura de la cubierta 3, zona triangular (m)"
REAL H_min = 0
REAL H_r = 3 "Altura de parte triangular en cuadernas (m)"
REAL H_r6 = 4 "Altura de parte triangular en cuadernas (m)"
REAL H_r7 = 4 "Altura de parte triangular en cuadernas (m)"
```

--Coeficientes de masa añadida en función de la frecuencia

```
TABLE_1D MA_11 = { { 0.39300, 0.40600, 0.41900, 0.43400, 0.44900,
0.46500, 0.48300, 0.50300, 0.52400, 0.54600, 0.57100, 0.59800, 0.62800, 0.66200,
0.69800, 0.73800, 0.76000, 0.78500, 0.81000, 0.83700, 0.86500, 0.89500, 0.96500,
1.04800, 1.14700},
{ 7.356e4, 7.337e4, 7.306e4, 7.252e4, 7.197e4, 7.132e4,
7.038e4, 6.955e4, 6.894e4, 6.947e4, 7.000e4, 7.035e4, 7.034e4, 7.029e4, 6.998e4,
6.807e4, 6.643e4, 6.367e4, 5.979e4, 5.455e4, 4.807e4, 4.061e4, 2.531e4, 1.626e4,
1.281e4 } }

TABLE_1D MA_13 = { {0.39300, 0.40600, 0.41900, 0.43400, 0.44900,
0.46500, 0.48300, 0.50300, 0.52400, 0.54600, 0.57100, 0.59800, 0.62800, 0.66200,
0.69800, 0.73800, 0.76000, 0.78500, 0.81000, 0.83700, 0.86500, 0.89500, 0.96500,
1.04800, 1.14700},
{-7.451e4,-7.480e4,-7.445e4,-7.360e4,-7.221e4,-6.727e4,-
7.293e4,-6.017e4,-5.358e4,-4.521e4,-4.944e4,-5.549e4,-4.730e4,-5.258e4,-5.242e4,-
5.312e4,-6.076e4,-5.482e4,-5.588e4,-5.693e4,-5.787e4,-5.835e4, -5.736e4,-5.385e4,-
4.960e4 } }
```

13 RESULTADOS DE LA SIMULACION

Datos geométricos del barco



Figura 14: Datos geométricos

LOA = 120 m es la longitud total del barco
LOA/n = 12m es la longitud de cada bloque
Cuaderna 1: ángulos : **a[1] = 22.21° ; b = 43**
Cuadernas 2 a 5: **a[2] = 37.09° ; a[3] = 38.50° ;**
a[4] = 44.67° ; a[5] = 49.67° ; a[6] = 53.70° ;
H_{c3} = 6.2 m.
Cuadernas 6 y 7: **a[7] = 64.64° ; a[8] = 67.17° ;**
a[9] = 68.50° ; H_{r6} = 4 m
Cuadernas 8 a 10: **a_f = 73.55° ; H_r = 3 m**

Se ha bajado la altura del casco triangular de las cuadernas 6 a 10 para ajustar a los datos experimentales de posición del CF y distancia del agua al fondo del barco en reposo. Esto se debe a que se ha trabajado con los planos de un modelo de Alhambra distinto al estudiado.

Resultados con modelo CF móvil y con modelo de bloques

Los resultados que se obtienen para ambos modelos son idénticos. Los datos experimentales del barco son:

$$H_0 = 2.4 \text{ m}$$

$$Z_0 = 0 \text{ m}$$

$$q = 0 \text{ rad}$$

$$X_B = -13.39 \text{ m}$$

$$Z_B = 0.867 \text{ m}$$

Nuestro modelo de barco se sumerge **37.8 cm** más que el barco real. El CF queda **43 cm** a la derecha. Esto supone que haya un un momento en el eje Y negativo y que el ángulo **q** sea ligeramente negativo, de **0.72°**. Tenemos que el centro del barco (**Z₀**) queda sumergido **24 cm**. Esto se debe a que el eje de giro se

va a encontrar en un punto situado entre el CG y el CF del barco.

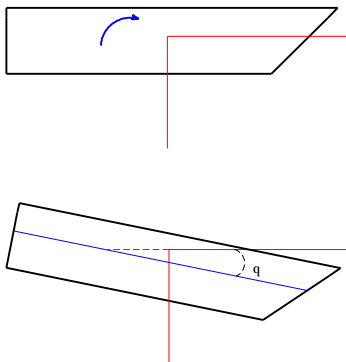


Figura 15: Error en la situación de equilibrio

En la figura 15 está exagerado el movimiento para observar el desplazamiento de Z_0 .

Resultados con oleaje

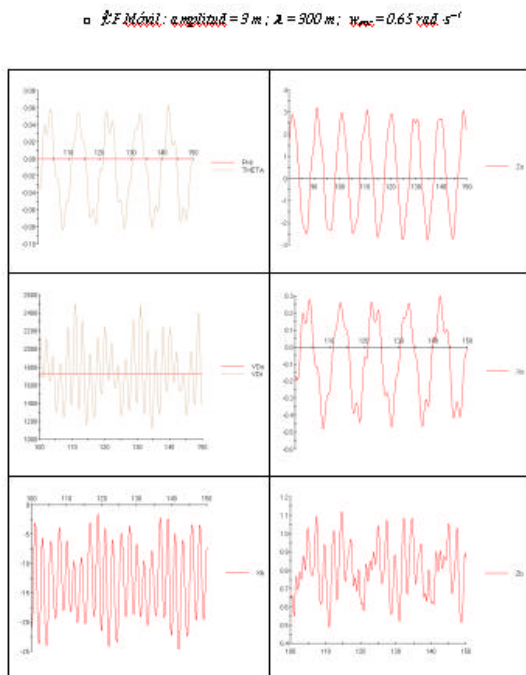


Figura 16: Resultados con oleaje

En equilibrio tenemos la siguiente situación:

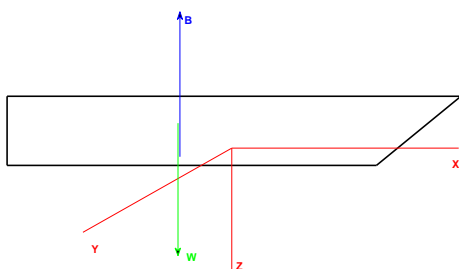


Figura 17: Situación inicial

Podría parecer una situación de equilibrio inestable, pero cualquier movimiento del barco fuera del equilibrio, sobre todo en el caso de variación del ángulo θ produce un desplazamiento del centro de flotación (CF) de tal manera que se genera un momento que tiende a llevar al barco a su posición de equilibrio. Como las variaciones en altura del CF son pequeñas comparadas con las longitudinales, ceñimos la explicación a éstas.

Cuando llega la ola, el volumen desalojado (VD) de los primeros nodos aumenta, eso supone que el empuje total aumente y que el CF se desplace hacia la proa del barco. Esto genera un momento positivo en el eje Y que provoca que el barco gire aumentando el ángulo θ . El eje de giro estará en un punto situado entre el CG y el CF, como ambas magnitudes son del mismo orden es de prever que se encuentre más o menos equidistante de ambos puntos.

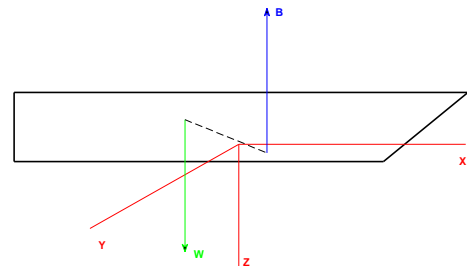


Figura 18: Desplazamiento de centros

Este eje se va a encontrar, por lo tanto, cerca del eje Y del sistema de referencia situado en el centro del barco. Eso supone que el giro va a producir sólo una variación del ángulo θ .

Como el volumen total del barco ha aumentado respecto al del equilibrio, el empuje total será mayor que el peso y habrá una fuerza neta hacia arriba y hace que el barco suba ($Z_0 < 0$).

Cuando la ola se va acercando a los nodos finales empieza a aumentar el VD de los mismos. Eso hace que el centro de flotación se traslade hacia popa. Eso genera un momento con dirección del eje Y, sentido negativo, pero considerablemente separado del eje Y del centro del barco.

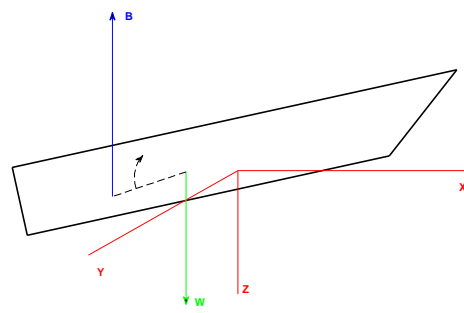


Figura 19

Este giro supone dos movimientos: de *pitch* (cambia el ángulo θ) y una bajada de Z_0 . Esta bajada de Z_0 hace que aumente mucho el VD, y por ello que aumente el empuje total. Esto lleva a el centro del barco baje menos de lo que cabría esperar si el CG y CF estuvieran en el centro del barco y que la variación del ángulo θ sea también menor.

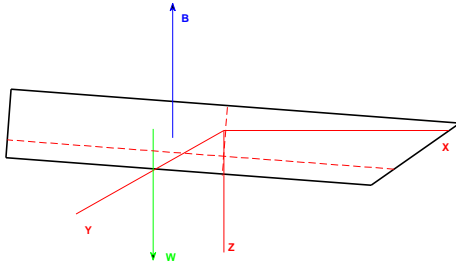


Figura 20

Esto puede explicar la asimetría de Z_0 y de θ , efectos que son más patentes si aumentamos la altura de la ola. Esto se debe a que cuanto mayor es la ola, mayor va a ser el VD por nodo, mayor la traslación del CF y, por tanto, un eje de giro más separado del eje que pasa por el centro del barco.

14 CONCLUSIONES

Este trabajo supone la punta de la lanza en lo que respecta a la creación de un entorno de modelado y simulación de vehículos marinos de superficie. Quedan todavía algunos puntos por mejorar objetivo que esperamos conseguir en futuros desarrollos.

Debido al nuevo proyecto asignado al departamento que lleva por título "Control en seis grados de libertad de ferries rápidos para mejora de la seguridad y confort" (DPI2000-0386-C03-01) se continuará mejorando el entorno hasta cumplir los objetivos fijados.

Agradecimientos

A Empresarios Agrupados y especialmente a Pedro Cobas y a Ramón Pérez-Vara por toda la ayuda recibida.

A los ingenieros de BAZAN y del CEHIPAR por su inestimable colaboración.

Este trabajo ha sido realizado dentro de los proyectos CYCIT (TAP97-0607-C03) y (DPI2000-0386-C03-01)

Referencias

[1] Thor I. Fossen. *Guidance and control of ocean vehicles*. Jhon Wiley and sons

[2] Principles of Naval Architecture. Vol III Motions in Waves and Controllability. E.V. Lewis (editor). Society of Naval Architects and Marine Engineers. 1989

[3] Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather. A.R.J.M. lloyd. Ellis. Horwood. 1989.

Página WEB del proyecto

<http://ctb.dia.uned.es/cribav>

<http://ctb.dia.uned.es/conbav>

Donde se encuentran informes técnicos sobre el proyecto y artículos, software y presentaciones.

