

**Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática**

IE – 431 Sistemas de Control

MONOGRAFIA

Aplicaciones de Control en Barcos

GRUPO:	01
INTEGRANTES:	Jeremías Chaves Varela Aarón Picado Calvo Juan Miguel Steller Solórzano
PERIODO:	II Semestre de 2005

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	1
1.0 Introducción	2
2.0 Desarrollo teórico.....	4
2.1 Modelos matemáticos para el control de gobierno de barcos	4
2.3.2 Notación para describir el movimiento de un barco	4
2.2 Ecuaciones dinámicas con 3 grados de libertad.....	6
2.3 Modelos No Lineales	7
2.4 Modelos Lineales	7
2.5 Modelos Lineales con adición de no linealidades.....	8
2.6 Ecuaciones dinámicas con 4 grados de libertad.....	9
2.7 Tipos de controladores clásicos y la teoría de la evolución aplicada	10
3.0 Aplicaciones.....	14
3.1 Modelado de la dinámica y control del gobierno de un buque.	14
3.2 Disminución del índice de mareo mediante un controlador PD sobre el movimiento de arfa y el ángulo de cabeceo en un buque de alta velocidad	21
3.2.1 Modelos utilizados:	22
Modelos lineales de la dinámica vertical de un buque de alta velocidad	22
Modelo de los actuadores.....	24
Modelo del proceso.....	24
3.2.2 Especificaciones.....	27
3.2.3 Diseño de los controladores	28
3.2.4 Estudio de la disminución del índice de mareo con posiciones fijas de los actuadores	30
3.2.5 Resultados obtenidos	31
3.2.6 Conclusiones sobre la aplicación	34
3.3 Control Clásico Multivariable De Un Ferry Rápido.....	36
3.3.1 Modelos Utilizados	36
3.3.2 Especificaciones.....	37
3.3.3 Diseño de los controladores	37
3.3.4 Resultados	40
3.3.5 Conclusiones sobre la aplicación	41
3.4 Entorno para el análisis de la robustez de controladores en aplicaciones de control de buques	42

4.0	Conclusiones.....	55
5.0	Bibliografía.....	57
6.0	Apéndices	58
6.1	Apéndice A	58
6.2	Apéndice B	59
7.0	Glosario	61

RESUMEN

Este trabajo es una continuación del realizado por Steller y otros[9], sobre las aplicaciones de la teoría de control automático al movimiento de barcos.

La mayoría de estas aplicaciones están orientadas hacia la comodidad del pasajero por medio de la disminución del mareo que este pueda sufrir. Esto se logra mediante la utilización de diversos controladores clásicos, (PD, Redes de primer y segundo orden). Se expone además un método para el análisis de la robustez, análisis μ aplicado a un buque controlado mediante un controlador PD.

Se han incluido los modelos del movimiento del buque como base fundamental para poder desarrollar adecuadamente los sistemas de control. También se ha incluido un glosario de términos náuticos para así facilitar el entendimiento de algunas expresiones, comunes en el ámbito marítimo.

1.0 Introducción

A lo largo de la historia, la navegación ha sido fundamental para el desarrollo de los pueblos. Durante siglos significó la más importante forma de transporte, comercio y desarrollo bélico. Hoy en día además de estos propósitos, se ha incluido la importante industria turística, la cual ha requerido barcos cada vez más seguros, estables y cómodos, para el disfrute de sus ocupantes.

Más recientemente, la industria (mundial) del transporte de pasajeros por mar, ha sufrido un impulso importante debido al temor que experimentó el público en general, después de los atentados del 11 de septiembre del 2001 en New York. Esta desconfianza en el uso de la aeronaves comerciales, facilitó el desarrollo de los llamados barcos rápidos de transporte de pasajeros “Fast Ferries”, que se utilizan para viajes cortos que tengan una duración de entre 30 minutos y 2 horas, sin que haya una diferencia significativa con respecto al tiempo que dura el avión (contando tiempos de traslado al aeropuerto y facturación). Adicionalmente, tienen la ventaja de tener un precio menor y una facilidad de transportar más equipaje. El principal inconveniente de estos barcos es que, si las condiciones de la mar no son muy favorables, el viaje no es confortable debido a los movimientos que provoca el oleaje sobre el barco. Para obtener la alta velocidad se están utilizando nuevas turbinas o ‘jets’ para la propulsión y de los cascos de poco peso. Esto hace que tengan un calado muy pequeño y que naveguen en modo de semideslizamiento. Estas dos características hacen que éstos sean muy sensibles al oleaje.

La aplicación del control automático en la navegación de barcos, es muy amplia y posee un gran desarrollo tecnológico, por lo que, el estudio en este campo se hace interesante ya que genera una buena idea de lo que es la utilización de los sistemas de control en un área importante del comercio mundial.

Es necesario desarrollar un modelo matemático, que describa con fidelidad el comportamiento físico del barco, describiendo así su dinámica. Si el modelo matemático del sistema no es exacto o no es robusto (estable frente a perturbaciones externas), el sistema presenta incertidumbres. Además, se debe tomar en cuenta que casi ningún comportamiento en la vida real es lineal, por lo que, al llevar a cabo un modelo lineal del sistema, este debe ser capaz de asimilar el comportamiento real del objeto en cuestión. Las variaciones no lineales en un barco obedecen, por ejemplo, a cambios de rumbo, e incluye las limitaciones del ángulo y velocidad del timón.

Se han empleado algoritmos genéticos (AG) para obtener la sintonía óptima de los controladores, pues, esta técnica de optimización se basa en la teoría de la evolución, en la que se favorece la supervivencia de los miembros más aptos de una población en perjuicio de los más débiles. Se actúa sobre una población de individuos definidos por un cromosoma formado por genes binarios. Los algoritmos genéticos actúan sobre los cromosomas utilizando las leyes de selección, cruzamiento y mutación, durante un número de generaciones dado.

Además, dentro de las aplicaciones desarrolladas, se muestra el uso de controladores de tipo PD y redes de primer y segundo orden como respuesta a la búsqueda de la disminución del MSI “Motion Sickness Incidente” o índice de personas que vomitan en dos horas).

Finalmente, con el uso de herramientas de simulación en el diseño de sistemas de control de gobierno de un buque, como el es el caso de Matlab[®] y Simulink[®], es posible evaluar las técnicas utilizadas en el diseño por medio de las respuestas obtenidas.

2.0 Desarrollo teórico

2.1 Modelos matemáticos para el control de gobierno de barcos^[6]

El uso de la simulación en el diseño de sistemas de control de gobierno de un buque, ha hecho necesario el desarrollo de modelos dinámicos que conservando las principales características de comportamiento, permitan una implementación lo más sencilla posible.

La dinámica de un barco consta de un sólido rígido, es decir, no deformable, con 6 grados de libertad, uno de traslación y otro de rotación en cada uno de los 3 ejes cartesianos x , y , z .

Para los modelos mencionados anteriormente se consideran inicialmente tres grados de libertad, pues el movimiento se realiza en el plano horizontal. Se pueden linealizar en un pequeño intervalo alrededor del estado de equilibrio, los modelos no lineales a los que dan lugar según distintas expresiones de las fuerzas y movimientos hidrodinámicos.

Estos modelos lineales sólo permiten describir el movimiento del buque en línea recta. Si se desea describir otro movimiento del buque, es necesario ingresar términos no lineales en el modelo.

En el caso de los barcos porta contenedores o de los que desarrollan altas velocidades, es necesario considerar el movimiento de balance, lo que genera modelos de cuatro grados de libertad.

2.3.2 Notación para describir el movimiento de un barco

El movimiento de un buque en el mar se describe respecto a un eje de referencia inercial. Se puede considerar que un sistema de referencia situado en tierra O es un sistema inercial.

Para representar el movimiento de un barco se necesitan seis coordenadas independientes, tres para describir la traslación sobre los ejes x_B , y_B , y z_B (avance, desplazamiento lateral y arfada respectivamente), referidos a un sistema de coordenadas móvil situado en el buque O_B . Las tres restantes son de rotación (balanceo, cabeceo y guiñada respectivamente) del sistema de coordenadas móvil del buque respecto al sistema de coordenadas inercial de referencia situado en tierra O .

En la Figura 1 se representa los sistemas de coordenadas y la definición de los movimientos de traslación y rotación del buque.

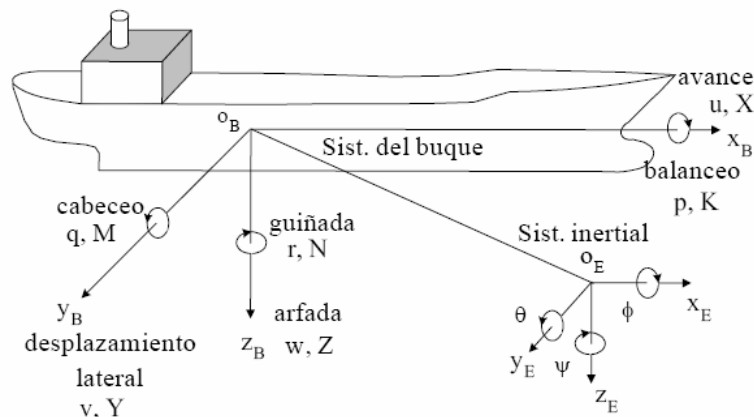


Figura 1. Sistema de coordenadas con la definición de ángulos y velocidades.^[6]

Debido a que el centro de gravedad (CG) varía en un buque dependiendo de sus condiciones de carga, no es conveniente por lo tanto, hacer coincidir este punto con el origen del sistema de coordenadas del buque, pues esto sólo sería útil si el centro de gravedad estuviese situado en el plano principal de simetría. La opción más utilizada que permite lograr una reducción de la complejidad de las ecuaciones, consiste en elegir un sistema de coordenadas ortogonal paralelo a los ejes principales de inercia.

La Tabla 1 resume la nomenclatura que describe el movimiento de un buque y las fuerzas y momentos. Esta es la notación estándar recomendada para su utilización en las aplicaciones de maniobra y control de barcos.

Traslación	Fuerza	Velocidad lineal	Posición
Avance	X	u	x
Desp. lateral	Y	v	y
Arfada	Z	w	z
Rotación	Momento	Velocidad angular	Angulo
Balanceo	K	p	ϕ
Cabeceo	M	q	θ
Guiñada	N	r	ψ

Tabla 1. Nomenclatura utilizada para describir el movimiento del barco.^[6]

Las velocidades lineales y angulares, las fuerzas y los momentos se definen normalmente con relación al sistema de coordenadas del buque (Sistema local). Sin embargo, para representar la posición y orientación se utiliza el sistema inercial de referencia (Sistema General). Así, el vector velocidad respecto al sistema de coordenadas buque queda definido por:

$$v = [v_1^T, v_2^T]^T \text{ con } v_1 = [u, v, w]^T \text{ y } v_2 = [p, q, r]^T \quad (1)$$

Y el vector posición y orientación respecto al sistema inercial de referencia por:

$$\eta = [\eta_1^T, \eta_2^T]^T \text{ con } \eta_1 = [x, y, z]^T \text{ y } \eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T \quad (2)$$

La derivada del vector de posición y orientación $\dot{\eta}$ permite describir la trayectoria seguida por el barco. Este vector está relacionado geoméricamente con el vector velocidad v por la transformación:

$$\dot{\eta} = J(\eta_2)v \quad (3)$$

Donde $J(\eta_2)$ es una matriz de transformación que depende de los ángulos de Euler (ϕ, θ, ψ) .

Entonces, las ecuaciones del movimiento del barco con relación al sistema coordenado de O_B a partir de las ecuaciones de Newton se pueden expresar en forma vectorial por:

$$M_{RB} \dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{RB} \quad (4)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta_2)v \quad (5)$$

Donde M_{RB} es la matriz de masas e inercia y $C_{RB}(v)$ es la matriz centrípeta y de Coriolis, ambas debidas a la dinámica del sólido rígido. τ_{RB} es un vector generalizado de las fuerzas y momentos externos que está compuesto por las fuerzas y momentos hidrodinámicos producidos por el movimiento del casco en el agua, las debidas a las superficies de control (timones, aletas, etc.), las generadas por los sistemas d propulsión y las debidas a perturbaciones ambientales (olas, viento y corrientes).

2.2 Ecuaciones dinámicas con 3 grados de libertad^[10]

Para representar el movimiento de un barco en el plano horizontal se suelen utilizar dos modelos con tres grados de libertad en los que únicamente se consideran los movimientos de avance, guiñada y desplazamiento lateral. El resto de movimientos (balanceo, cabeceo y arfada) se consideran despreciables. Si se sitúa el sistema de coordenadas O_B del barco coincidiendo con los ejes principales de inercia, la ecuación (4) se reduce a:

$$M_{RB(3 \times 3)} \dot{v} + C_{RB(3 \times 3)}(v)v = \tau_{RB(3 \times 1)} \quad (6)$$

donde,

$$M_{RB(3 \times 3)} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mx_G \\ 0 & mx_G & I_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C_{RB(3 \times 3)}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(x_G r + v) \\ 0 & 0 & mu \\ m(x_G r + v) & -mu & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\tau_{RB(3 \times 1)} = [X, Y, N]^T \quad (9)$$

Que se suelen representar de forma compacta como:

$$\begin{aligned} \text{Avance:} \quad & m(\dot{u} - vr - x_G r^2) = X \\ \text{Desp. lateral:} \quad & m(\dot{v} - ur + x_G \dot{r}) = Y \\ \text{Guiñada:} \quad & I_z \dot{r} + mx_G(ur + \dot{v}) = N \end{aligned} \quad (10)$$

2.3 Modelos No Lineales

Cada modelo no lineal difiere básicamente en la expresión de las fuerzas hidrodinámicas (X, Y) y de los momentos hidrodinámicos (N) de la ecuación (9) que son complicadas funciones del movimiento del barco.

Existen varios modelos para representar X, Y y N , como los son: el de Abkowitz, el de Norrbin y el de Blanke. Los cuales, han sido desarrollados en algunos de los textos incluidos en la bibliografía.

2.4 Modelos Lineales

Para obtener las ecuaciones lineales del movimiento, se parte de la ecuación (10) y se supone que la velocidad transversal v , la velocidad de guiñada r y el ángulo del timón δ son pequeños. Esto implica que (suponiendo que la velocidad del barco u_0 no varía y el empuje se mantiene constante), la primera ecuación (movimiento longitudinal) se puede desacoplar de las otras dos (movimiento transversal y guiñada). También se considera que la velocidad transversal y de guiñada son nulas ($v_0 = r_0 = 0$). Así, para pequeñas perturbaciones alrededor de los valores nominales u_0, v_0 y r_0 , la ecuación (10) se puede escribir como:

Ec. de la velocidad: $X = m\dot{u}$

Ecuaciones de gobierno:

$$\begin{aligned} Y &= m(\dot{v} - u_0 r + x_G \dot{r}) \\ N &= I_z \dot{r} + m x_G (u_0 r + \dot{v}) \end{aligned} \quad (11)$$

La primera ecuación relaciona el empuje del propulsor con la velocidad del barco y, aunque esta relación es eminentemente no lineal, en el estudio del gobierno del buque por modelos lineales se supone que su velocidad se mantiene constante y sólo se consideran las ecuaciones de gobierno.

Linealizando las funciones Y , N , alrededor del estado de equilibrio $v = r = \delta = 0$ en la ecuación (9) se obtienen:

$$\begin{aligned} Y &= Y_v v + Y_v \dot{v} + Y_r r + Y_r \dot{r} + Y_\delta \delta \\ N &= N_v v + N_v \dot{v} + N_r r + N_r \dot{r} + N_\delta \delta \end{aligned} \quad (12)$$

Que sustituyendo en las ecuaciones de gobierno de la ecuación (11) y ordenando, resulta:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} m - Y_v & m x_G - Y_r \\ m x_G - N_v & I_z - N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} &= \\ &= \begin{bmatrix} Y_v & Y_r - m u_0 \\ N_v & N_r - m x_G u_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix} \delta \end{aligned} \quad (13)$$

Debido a que el desarrollo de los siguientes modelos lineales ya ha sido mencionado en otros textos (ver bibliografía), sólo se mostrarán los nombres de los modelos lineales, a saber:

- Modelo de espacio de estado.
- Modelo de función de transferencia.

2.5 Modelos Lineales con adición de no linealidades

Los modelos lineales sólo se pueden utilizar para pequeñas desviaciones del punto de equilibrio $v = r = \delta = 0$. Sirven para describir adecuadamente el movimiento de un barco en una trayectoria recta. Si embargo, si se desea estudiar las características de giro del barco, sólo pueden utilizarse en el intervalo lineal en buques con estabilidad direccional. Para poder aumentar el intervalo de validez de los modelos lineales, varios autores proponen la adición de un término no lineal al modelo lineal:

$$T_1 T_2 \ddot{\psi} + (T_1 + T_2) \dot{\psi} + KH(\psi) = K(\delta + T_3 \dot{\delta}) \quad (14)$$

Donde $H(\psi)$ es una función no lineal de ψ que se puede obtener de la relación entre ψ y δ en el estado de equilibrio por medio de la prueba de espiral, y que puede aproximarse por:

$$H(\psi) = a\psi^3 + b\psi \quad (15)$$

2.6 Ecuaciones dinámicas con 4 grados de libertad

En algunos buques como por ejemplo los buques contenedores de guerra o en los ferries de alta velocidad, además de los movimientos de avance, desplazamiento lateral y guiñada se debe incluir también el movimiento de balance en el modelo matemático. Si se sitúa el sistema con los ejes principales de inercia, la ecuación (4) se reduce a:

$$M_{RB(4 \times 4)} \dot{v} + C_{RB(4 \times 4)}(v)v = \tau_{RB(4 \times 1)} \quad (16)$$

Donde el vector de velocidades viene dado por:

$$v = [u, v, p, r]^T \quad (17)$$

La matriz de masas e inercia tiene la forma:

$$M_{RB(4 \times 4)} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & -mz_G & mx_G \\ 0 & -mz_G & I_x & 0 \\ 0 & mx_G & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (18)$$

La matriz de fuerzas centrípeta y de Coriolis es:

$$C_{RB(4 \times 4)}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & mz_G r & -m(x_G r + v) \\ 0 & 0 & 0 & mu \\ -mz_G r & 0 & 0 & 0 \\ m(x_G r + v) & -mu & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Siendo m la masa del buque, u y v las velocidades lineales de avance y desplazamiento lateral y p y r las velocidades angulares de balanceo y cabezada.

El vector de las fuerzas externas totales en los ejes x_B y y_B (X , Y) y los momentos externos totales en los ejes z_B y y_B (N y K) es:

$$\tau_{RB(4 \times 1)} = [X, Y, K, N]^T \quad (20)$$

Que se suele representar de forma compacta como:

$$\begin{aligned} \text{Avance:} \quad & m(\dot{u} - vr - x_G r^2 + z_G pr) = X \\ \text{Desp. lateral:} \quad & m(\dot{v} - ur - z_G \dot{p} + x_G \dot{r}) = Y \\ \text{Balanceo:} \quad & I_x \dot{p} - m z_G (ur + \dot{v}) = K \\ \text{Guiñada:} \quad & I_z \dot{r} + m x_G (ur + \dot{v}) = N \end{aligned} \quad (21)$$

2.7 Tipos de controladores clásicos y la teoría de la evolución aplicada

A través de los tiempos, se han implementado varios tipos de controladores clásicos:

$$\text{PID Mixto:} \quad G_c(s) = kp \frac{a Ti Td s^2 + [Ti + (a+1)Td]s + 1}{Ti s (aTd s + 1)} \quad (22)$$

$$\text{PD Mixto:} \quad G_c(s) = kp \frac{(a+1)Td s + 1}{aTd s + 1} \quad (23)$$

$$\text{PID Paralelo:} \quad G_c(s) = \frac{kpa Ti Td s^2 + [kpTi + (a+1)Td]s + 1}{Ti s (aTd s + 1)} \quad (24)$$

$$\text{PD Paralelo:} \quad G_c(s) = \frac{(kpa + 1)Td s + kp}{aTd s + 1} \quad (25)$$

$$\text{PID Serie:} \quad G_c(s) = kp \frac{Ti Td s^2 + (Ti + Td)s + 1}{Ti s (aTd s + 1)} \quad (26)$$

$$\text{PD Serie:} \quad G_c(s) = kp \frac{1 + Td s}{aTd s + 1} \quad (27)$$

$$\text{Red de primer orden:} \quad G_c(s) = kp \frac{s + z}{s + p} \quad (28)$$

$$G_c(s) = kp \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{aT}}$$

Red de adelanto: (29)

$$G_c(s) = kp \frac{\left(s + \frac{1}{T1}\right)\left(s + \frac{1}{T2}\right)}{\left(s + \frac{a}{T1}\right)\left(s + \frac{1}{aT2}\right)}$$

Red de atraso-adelanto: (30)

para $0.05 < a < 0.95$

Algoritmos genéticos (AG) para sintonizar controladores

Se han empleado algoritmos genéticos (AG) para obtener la sintonía óptima de los controladores. Esta técnica de optimización se basa en la teoría de la evolución, en la que se favorece la supervivencia de los miembros más aptos de una población en perjuicio de los más débiles. Se actúa sobre una población de individuos definidos por un cromosoma formado por genes binarios. Los algoritmos genéticos actúan sobre los cromosomas utilizando las leyes de selección, cruzamiento y mutación, durante un número de generaciones dado. Se parte de la creación aleatoria de una población inicial $P(0)$, formada por p individuos. A esta población se le aplican unos operadores genéticos que la modifican de forma probabilística para crear una nueva población $P(1)$. El proceso se repite un número de generaciones T dado, obteniéndose las poblaciones sucesivas $P(t)$. La solución se obtiene entre los individuos de la última generación $P(T)$.

En la **Figura 2** se muestra el diagrama de flujo de un algoritmo genético.



Figura 2. Algoritmo genético

Terminología

Aptitud: La medida de la aptitud de los individuos de una población se realiza mediante la evaluación de los valores de la función objetivo Φ específica para cada problema dado. La aptitud de la población correspondiente a una generación dada se puede expresar por:

$$\Psi_t = \sum_{i=1}^p \Phi_{it} \quad (31)$$

Operador de selección: Se considera que la dimensión de la población se mantiene constante durante el proceso de selección. A cada individuo i de una población $P(t)$ se le asigna una probabilidad de selección basada en la medida de su aptitud.

$$s_{it} = \frac{\Phi_{it}}{\Psi_t} \quad (32)$$

El operador selecciona de forma aleatoria los individuos de la población $P(t)$ en función de las probabilidades s_{it} generando una nueva población $P'(t+1)$ con un valor de Ψ_t mayor.

Operador de cruzamiento: A la población intermedia $P'(t+1)$ se le aplica el operador de cruzamiento a partir de una tasa de cruzamiento ($0 < r_c < 1$). Para cada individuo de $P'(t+1)$ se genera un número aleatorio ($0 < r_i < 1$) y si $r_i < r_c$ se selecciona para el cruzamiento. Así, se

seleccionan un número par de individuos (padres) y eligiendo un punto aleatorio en sus cadenas de bits se combinan los cromosomas dando lugar a dos nuevos descendientes.

Sean A y B los padres de una población y un punto aleatorio k como se indica a continuación:

$$\begin{array}{r} A=10010|1100011 \\ B=10100|0001101 \\ \quad \quad \quad \downarrow k \end{array}$$

Utilizando el operador de cruzamiento se obtienen los cromosomas que se indican:

$$\begin{array}{r} A^*=10010|0001101 \\ B^*=10100|1100011 \\ \quad \quad \quad \downarrow k \end{array}$$

Así, se obtiene una nueva población $P''(t+1)$.

Operador de mutación: Mediante este operador se altera de forma aleatoria la población $P''(t+1)$ invirtiendo uno o más bits de la cadena de algún cromosoma, utilizando una probabilidad de mutación rm , por ejemplo:

$$A=1110001\boxed{0}110101$$

Después de la mutación quedaría:

$$A^*=1110001\boxed{1}110101$$

La mutación se introduce para tratar de garantizar que se puede alcanzar cualquier punto del espacio de búsqueda y para prevenir que el algoritmo genético quede bloqueado en un óptimo local. Los valores de las tasas de cruzamiento y mutación influyen en las características de convergencia del método, dependiendo del problema y del algoritmo que se trate.

La función de costo que se maximiza en el algoritmo genético es $MejWVA = WVA$ (sin controlador) $- WVA$ (con controlador). Esto es equivalente a minimizar WVA con controlador.

3.0 Aplicaciones

En un trabajo anterior Steller y otros [9], mencionaron tres aplicaciones de la teoría de control automático en el funcionamiento de un buque, a saber:

- Controladores clásicos para la disminución de la aceleración vertical de un buque de alta velocidad.
- Control QFT Robusto a la Maniobra de Cambio de Rumbo de un Buque.
- Piloto automático de un buque mediante control no lineal adaptativo.

A continuación se explican otras aplicaciones, pues, la teoría de control se puede aplicar de diferentes maneras en muchas áreas de la ingeniería, siendo el funcionamiento de un buque un claro ejemplo de ello.

3.1 Modelado de la dinámica y control del gobierno de un buque^[7].

La aplicación que se expone a continuación es la utilización de la interfaz grafica con el que se desea monitorear y controlar el rumbo del buque, (esta interfaz se muestra en la figura 7). Rueda y otros [7] plantean un modelo para el sistema físico de un buque de manera general, el cual es utilizado para crear con la herramienta de programación “ Visual Basic ”, un código con el que se desea maniobrar el manejo y control de un buque dando la posibilidad de evaluar su comportamiento ante posibles variaciones en las condiciones de operación dentro de la región de operación que se establece en el diseño del sistema de control, que como es sabido sus limites van ha estar dadas por las limitantes físicas de funcionamiento del sistema.

Tomando en cuenta que el control de gobierno de un buque es una tarea básica en la navegación, necesaria para realizar todo tipo de maniobras como seguir una trayectoria planificada, realizar un cambio de rumbo, alcanzar un punto geográfico e incluso actuar ante un riesgo de colisión. Se presenta el diseño de la interfaz gráfica del piloto automático de un buque mediante el uso del lenguaje de programación Visual Basic, donde el rumbo y la posición del buque se conocen por medio de una unidad giroscópica¹ digital y un receptor GPS (Sistema de posicionamiento global) diferencial.

Para el control del sistema de gobierno del buque se ha utilizado un control en cascada con un controlador de ángulo de timón de tipo Todo-Nada en el lazo secundario el cual es un lazo interno que se muestra en la figura 3, en la cual se rotula cada uno de sus partes, permitiendo con un conocimiento previo de un sistema de control lograr el entendimiento de su funcionamiento.

¹ Giroscópica : Ver Glosario.

Se utiliza un controlador de rumbo de tipo PID en el lazo de control principal (figura 4), para obtener el rumbo y posición del buque deseados y la señal de salida de este controlador actúa sobre un lazo interno de control todo-nada, antes indicado, que se encarga de ajustar la posición del timón a la orden del controlador PID.

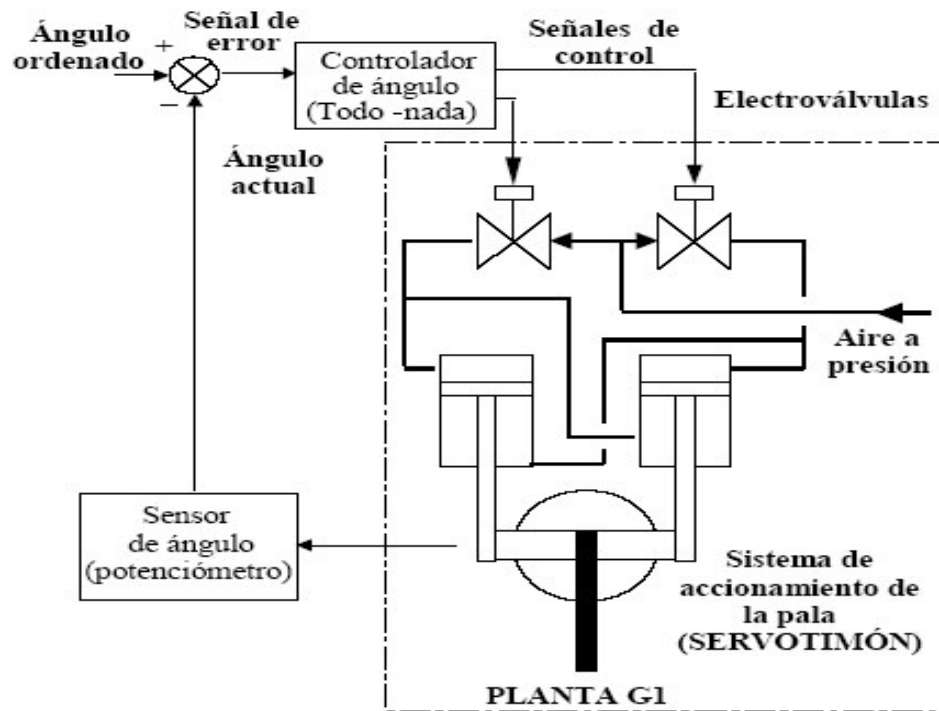


Figura 3: Lazo secundario de control, afuste del ángulo de timón ^[7].

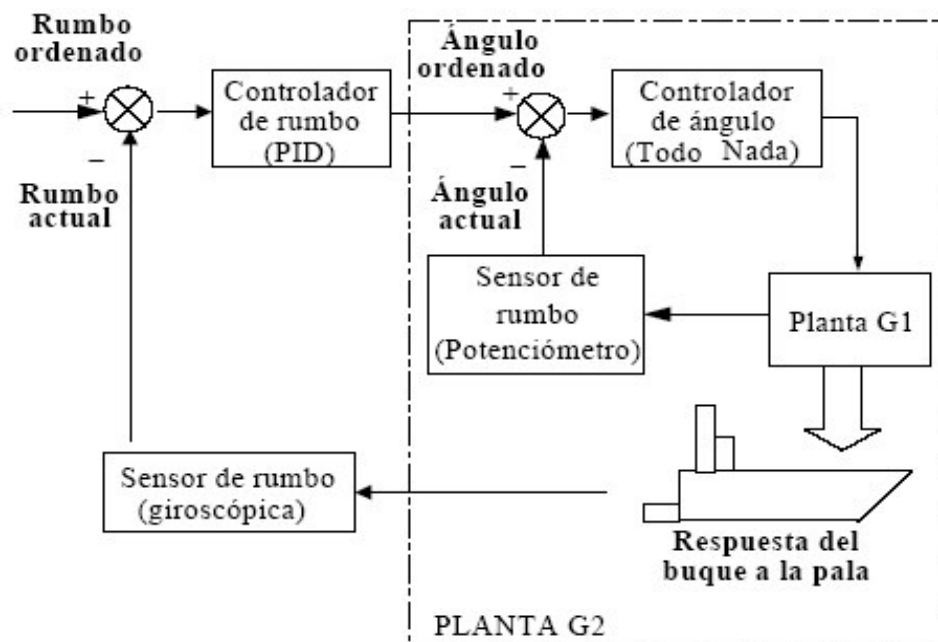


Figura 4: Lazo principal de control, afuste de dirección y posición del buque ^[7].

En un buque el servomotor de accionamiento del timón está formado por elementos (cilindro o motor) que convierten la potencia hidráulica en potencia mecánica de giro o traslación. Refierece a la figura 3 para lograr una mejor comprensión de la siguiente descripción. En el caso de emplear cilindros hidráulicos se pueden utilizar dos con movimiento lineal de vaivén y controlados a contrafase (figura 5) mediante una electro válvula hidráulica. Los vástagos de ambos cilindros accionan un yugo que convierte el movimiento rectilíneo en circular llevando así la pala del timón a una banda u otra el número de grados deseado. El ángulo de posición de la pala puede ser medido con un sensor. El buque se dirigirá bien hacia estribor^{II} o bien hacia babor^{III} ^[7],

El sistema de control lo desarrollaron con la posibilidad de seleccionar entre tres modos de funcionamiento posibles: Manual (actuando directamente sobre el controlador todo-nada), Giro y GPS, dichos esquemas de control son mostrados en el diagrama de bloques que se muestran en la figura 5.

Los esquemas de control se describen a continuación:

- a) El modo Manual es el más sencillo. El usuario debe introducir el ángulo de pala deseado la computadora, éste compara el ángulo ordenado con el actual (lectura del

^{II} Estribor : Lado derecho de la embarcación, visto de popa (posterior) a la proa.

^{III} Babor : Lado izquierdo de la embarcación, visto de popa a la proa.

-
- potenciómetro) y activa el controlador Todo-Nada. La señal del controlador activa las electroválvulas que mueven la pala del timón hasta la posición deseada.
- b) En el modo Giro el usuario introduce el rumbo deseado. El sistema compara dicho valor con el rumbo actual (lectura giro) y con el controlador PID se obtiene el ángulo de pala necesario para realizar la maniobra de cambio de rumbo. Si éste ángulo no coincide con el actual hay que fijar la nueva posición de la pala con el controlador todo-nada. El sistema actuará hasta que la diferencia entre el rumbo actual y el deseado sea admisible.
 - c) En el modo GPS se introduce la posición (latitud, longitud) deseada. El sistema calcula el rumbo necesario para ir desde la posición actual (lectura del receptor GPS) a la posición deseada. Éste es ahora el rumbo deseado. A partir de aquí el sistema funciona como en el caso anterior

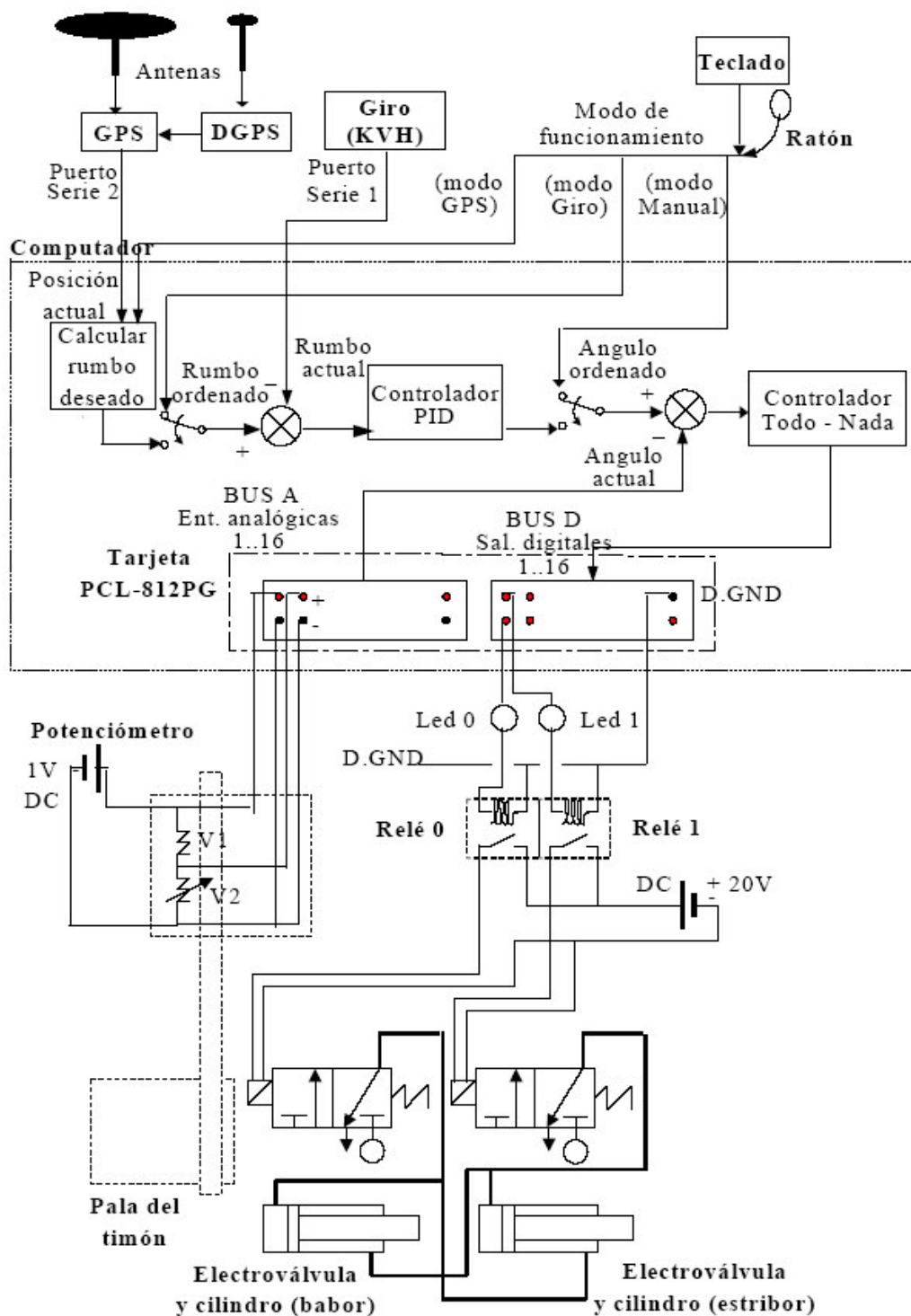


Figura 5: Estructura general de control de rumbo y posicionamiento de un buque ^[7].

En la figura 6 se muestra el diagrama de bloque del sistema de control desarrollada.

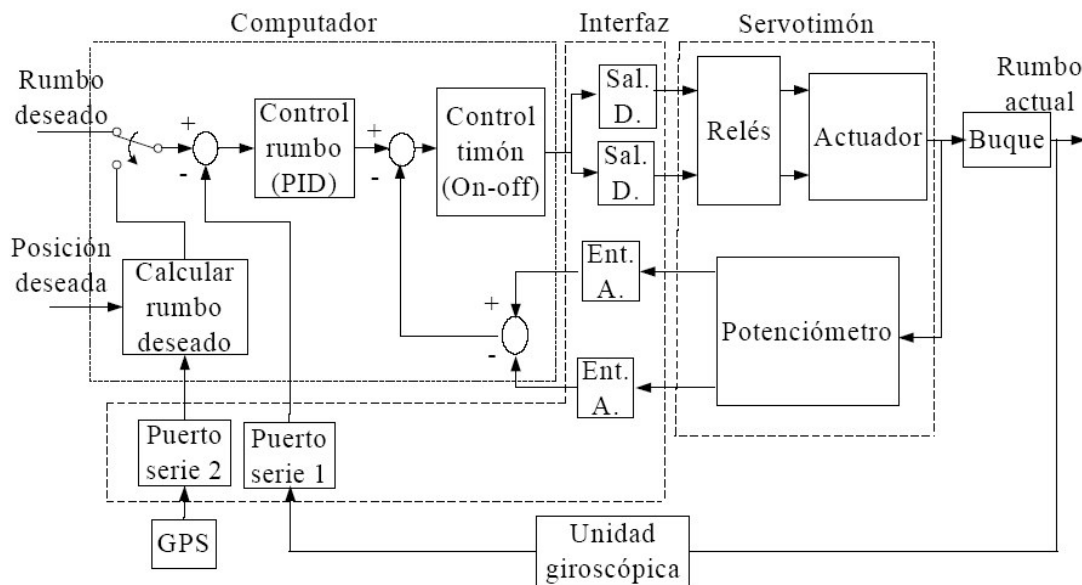


Figura 6: Diagrama de bloques del sistema de control de rumbo y posicionamiento de un buque^[7].

Lo que se desea lograr al dar a conocer este documento es el plantear que es posible la utilización de herramientas computacionales, como en este caso Visual Basic, o cual se podría lograr con las herramientas de Matlab® que el análisis del comportamiento del sistema y con la utilización de la teoría de control automático establecer control eficiente y de manera relativamente sencilla.

The screenshot shows a software interface for a boat control system. It features several panels for monitoring and controlling the vessel's position and heading. The central panel, 'Control del timón', allows for setting and monitoring the desired and actual heading. It includes a 'caída de proa' (Pitch drop) indicator and a 'caída de timón' (Steering drop) indicator. The left panel, 'Valores de entrada GPS', displays real-time GPS data. The right panel, 'Simulador entradas del GPS', provides a simulated environment for testing. The bottom section includes a 'PID' controller with adjustable gains (Kp, Ki, Kd) and a status area showing various system parameters like 'T. lectura GPS', 'Cadena GPS', 'Salidig', and 'Num. Eje'.

Figura 7: Pantalla del interfaz grafico desarrollado^[7].

3.2 Disminución del índice de mareo mediante un controlador PD sobre el movimiento de arfada y el ángulo de cabeceo en un buque de alta velocidad ^[2]

A continuación se describe el método de sintonía utilizado para ajustar el control PD y se muestran los resultados obtenidos para las velocidades del buque de 20, 30 y 40 nudos y para los estados de la mar 4, 5 y 6.

En un buque de alta velocidad, se debe procurar un índice de comodidad y seguridad para los pasajeros y la tripulación lo más alto posible. Pues, un desagradable inconveniente en el transporte marítimo es el mareo, producido en las personas debido a los diferentes movimientos del barco, los cuales son: Balanceo (roll en inglés), cabeceo (Pitch) y arfada (heave); y que se muestran en la Figura 8:

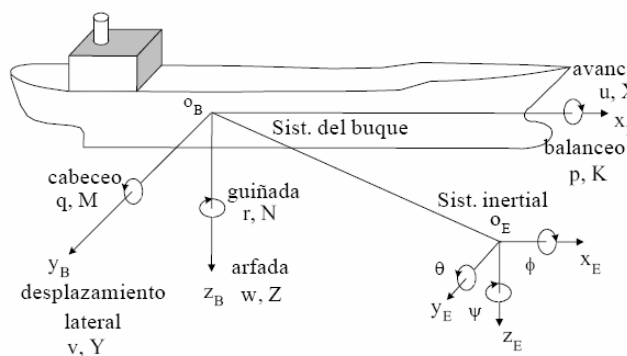


Figura 8. Sistema de coordenadas con la definición de ángulos y velocidades. ^[6]

Amortiguar el movimiento de balanceo es fácil de conseguir, no ocurre de la misma manera con los otros dos movimientos. Por lo tanto, se deben conseguir controladores robustos que controlen la acción de actuadores mecánicos diseñados para el amortiguamiento de estos dos movimientos. Un buque es un sistema multivariable complejo que actúa en un medio que introduce muchas perturbaciones (olas, vientos, etc). Una vez terminada la etapa de modelado de la dinámica vertical de un buque de alta velocidad así como de los actuadores a colocar, se procede a diseñar los controladores que serán capaces de gobernar el accionar de los actuadores con el propósito de disminuir las aceleraciones verticales que sufre el buque a consecuencia del oleaje.

Se ha diseñado un control de posición implementado mediante dos controladores PD, para distintas velocidades y distintos estados de la mar sobre el movimiento de arfada y el movimiento de cabeceo. Con este esquema se ha producido una disminución de las aceleraciones verticales y por tanto del índice de mareo. Se presenta también el método utilizado para sintonizar los controladores que está basado en la minimización de una función de costo no lineal.

3.2.1 Modelos utilizados:

Modelos lineales de la dinámica vertical de un buque de alta velocidad

Se han identificado modelos lineales continuos SISO (una entrada, una salida) para el momento del movimiento de cabeceo, la fuerza del movimiento de arfada, el movimiento de cabeceo y el movimiento de arfada. Se utiliza una nomenclatura como la siguiente:

$G_{1H}(s)$ es la función de transferencia que tiene como entrada la altura de olas (m) y como salida la fuerza del movimiento de arfada (kN).

$G_{2H}(s)$ es la función de transferencia que tiene como entrada la fuerza del movimiento de arfada (kN) y como salida el movimiento de arfada (m).

$G_{1P}(s)$ es la función de transferencia que tiene como entrada la altura de olas (m) y como salida el momento del movimiento de cabeceo (kN·m).

$G_{2P}(s)$ es la función de transferencia que tiene como entrada el momento del movimiento de cabeceo (kN·m) y como salida el movimiento de cabeceo (grados).

Estos modelos están normalizados, por lo que es necesario multiplicar el filtro G_{1H} por una ganancia K_1 , y multiplicar el filtro G_{2H} por una ganancia $1/K_1$. En el caso de G_{1P} la ganancia es K_2 y para G_{2P} la ganancia es $1/K_2$. Las ganancias K_1 y K_2 se calcularon utilizando los valores máximos de la fuerza del movimiento de arfada y del momento del movimiento de cabeceo que se obtuvieron en un estudio anterior de modelado de actuadores para una determinada velocidad U . El diagrama de bloques del modelo de la dinámica vertical del buque se muestra en la Figura 9:

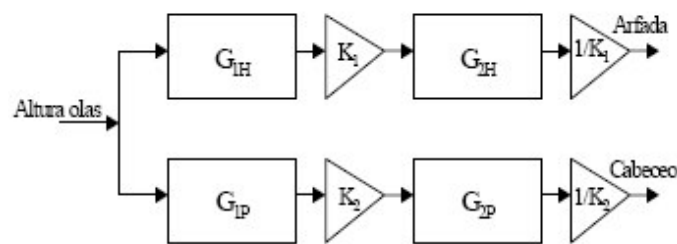


Figura 9: Diagrama de bloques del modelo de la dinámica vertical del buque.^[2]

El filtro G_{2H} fue necesario multiplicarlo por el filtro G_{corr} :

$$G_{corr} = \frac{100}{s+100} \quad (33)$$

para aumentar el orden del denominador de G_{2H} introduciendo un polo lejano en $s = -100$ que no tiene ninguna influencia sobre el comportamiento del sistema.

Definiendo:

$$\begin{aligned} G_{1He} &= K_1 \cdot G_{1H} & G_{2He} &= \frac{G_{2H}}{K_1} \cdot G_{corr} \\ G_{1Pe} &= K_2 \cdot G_{1P} & G_{2Pe} &= \frac{G_{2P}}{K_2} \end{aligned} \quad (34)$$

Es posible dibujar:

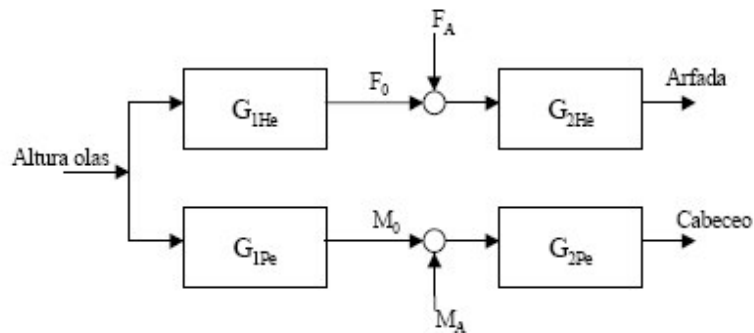


Figura 10: Diagrama de bloques del modelo de la dinámica vertical del buque, incluyendo las entradas FA y MA. ^[2]

Donde:

- F_0 es la fuerza del movimiento de arfada ejercida por el oleaje.
- F_A es la fuerza que del movimiento de arfada ejercida por los actuadores.
- M_0 es el momento del movimiento de cabeceo ejercido por el oleaje.
- M_A es el momento del movimiento de cabeceo ejercido por los actuadores.

Agrupando se obtiene:

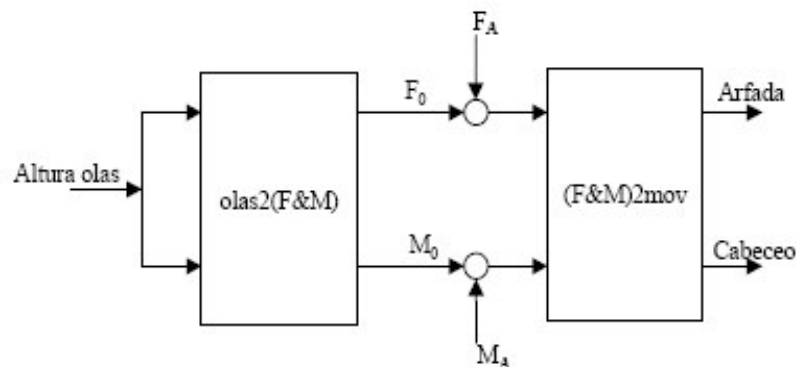


Figura 11: Diagrama de bloques agrupados del modelo de la dinámica vertical del buque. ^[2]

Modelo de los actuadores

Se diseñaron dos actuadores para intentar disminuir las aceleraciones verticales en el buque. Por un lado unas aletas en proa (T-Foil –Hoja en T–) y por otro lado un alerón en popa (Flap –Alerón–). Se obtuvo un modelo no lineal en Simulink® para dichos actuadores, que permite realizar tanto control en posición como control en velocidad. También se obtuvieron modelos lineales para los actuadores, que son válidos siempre y cuando no se produzca saturación. Básicamente el modelo de actuadores es un modelo no lineal con cuatro entradas (referencia posición o velocidad Alerón (Flap), referencia posición o velocidad de la hoja en T (T-foil), arfada y cabeceo) y dos salidas (F_A y M_A), como se muestra en la Figura 12:

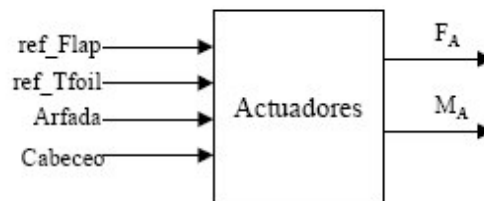


Figura 12: Modelo no lineal de los actuadores. ^[2]

Modelo del proceso

El modelo completo del proceso consta del modelo de la dinámica vertical del buque conectado con el modelo no lineal de los actuadores. Se trata de un modelo multivariable de 2 variables manipulables (referencia en posición o en velocidad de la hoja en T (T-foil) y referencia en posición o en velocidad del alerón (Flap), una variable de perturbación (la altura de las olas) y dos variables controladas (movimiento de arfada y movimiento de cabeceo). El diagrama de bloques del modelo del proceso se muestra en la Figura 13:

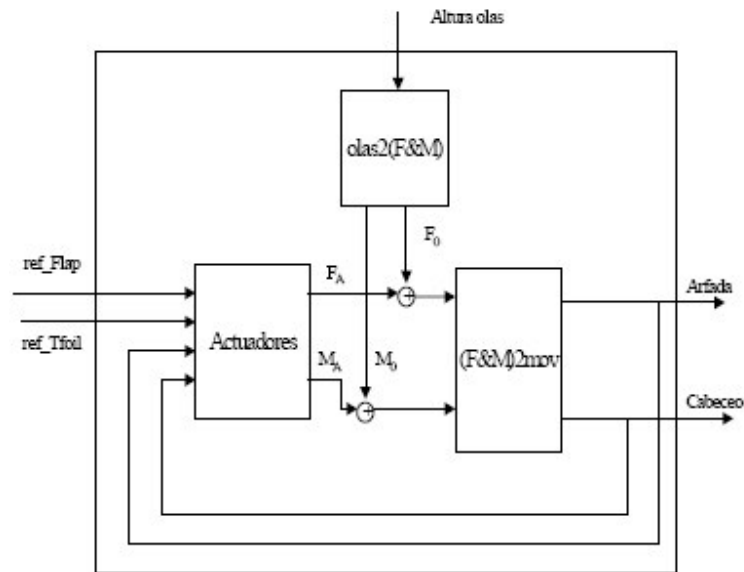


Figura 13: Diagrama de bloques del modelo del proceso. [2]

Estudio de la Interacción entre las variables del proceso

La dificultad de controlar un proceso multivariable reside en el grado de interacción que existe entre sus variables, dicha interacción se manifiesta de un modo más acentuado cuando está funcionando el controlador. El análisis de la interacción permite conocer mucho mejor al proceso, decidir sobre la conveniencia o no de utilizar una estrategia de control centralizado o si con un control descentralizado es suficiente.

El cálculo de la matriz de ganancias relativas o RGA, permitirá conocer el índice de interacción y resolver el problema del emparejamiento entre las variables manipuladas y las variables controladas (“pairing” o emparejamiento). Es lógico controlar cada variable controlada con la variable manipulada que tenga mayor influencia sobre ella.

Si se utilizan el modelo lineal de los actuadores para control en posición, que es válido siempre que no se esté en saturación, es posible representar al proceso mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} heave(s) &= G_{11}(s) \cdot ref_Flap(s) + G_{12}(s) \cdot ref_Tfoil(s) + G_{13}(s) \cdot olas(s) \\ pitch(s) &= G_{21}(s) \cdot ref_Flap(s) + G_{22}(s) \cdot ref_Tfoil(s) + G_{23}(s) \cdot olas(s) \end{aligned} \quad (35)$$

Si no se consideran las perturbaciones del proceso, las ecuaciones del proceso linealizado son:

$$\begin{aligned} heave(s) &= G_{11}(s) \cdot ref_Flap(s), \quad G_{12}(s) \cdot ref_Tfoil(s) \\ pitch(s) &= G_{21}(s) \cdot ref_Flap(s), \quad G_{22}(s) \cdot ref_Tfoil(s) \end{aligned} \quad (36)$$

Las variables manipulables son ref_Flap y ref_Tfoil . Las variables controladas son el movimiento de arfada y el movimiento de cabeceo. Con estas consideraciones la matriz RGA esta definida en Matlab® por:

$$RGA = SSGM * (inv(SSGM))' \quad (37)$$

donde SSGM es la matriz de ganancias en estado estacionario.

Del análisis de la magnitud de los elementos de la RGA se deducen los siguientes emparejamientos, los cuales no provocan inestabilidad en lazo cerrado según el teorema de Niederlinski:

- La variable manipulable ref_Flap se asociará con la variable controlada movimiento de arfada.
- La variable manipulable ref_Tfoil se asociará con la variable controlada movimiento de cabeceo.

Por otro lado la poca diferencia en magnitud entre los elementos de la diagonal y los elementos de fuera de la diagonal de la matriz RGA, indican la existencia de un acoplo, el cual no se debe pasar por alto, esto es, cualquier acción que se realice sobre alguna de las variables manipulables, afectará a ambas variables controladas y no sólo a la variable controlada con la que estaba emparejada. Por lo que se puede utilizar una estrategia de control descentralizado mediante el diseño adecuado de una red de desacoplo, o una estrategia de control centralizado.

Modelo de la red de desacoplo

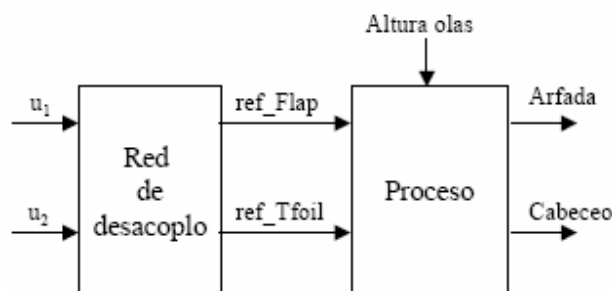


Figura 14: Red de desacoplo añadida al proceso. ^[2]

La red de desacoplo W utilizada, viene dada en función de las funciones de transferencia del proceso linealizado: G_{11} , G_{12} , G_{21} y G_{22} .

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} \\ w_{21} & w_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-G_{12}}{G_{11}} \\ \frac{-G_{21}}{G_{22}} & 1 \end{bmatrix} \quad (38)$$

Tiene dos entradas u_1 y u_2 para los controladores y dos salidas ref_Flap y ref_Tfoil .

3.2.2 Especificaciones

Se desea disminuir el índice de mareo MSI (Motion Sickness Incidence o porcentaje de personas que vomitan dentro de las dos horas), por lo que es necesario disminuir las aceleraciones verticales que sufre el buque, como consecuencia del movimiento de cabeceo y el movimiento de arfada provocados por el oleaje al que se encuentra sometido.

El valor medio $acv40$ de la serie temporal $acv40$ medida a lo largo de un trayecto es:

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |acv40(t_i)| \quad (39)$$

La función $acv40(t_i)$ es la aceleración vertical medida a 40 metros del centro de gravedad en el instante de tiempo $t_i = 0.25 \cdot (i-1)$ con $i=1, \dots, N$. (Siendo N el número total de muestras) y esta dada por la expresión:

$$\begin{aligned} acv40(t_i) &= a_{vh}(t_i) + a_{vp}(t_i) \\ acv40(t_i) &= \frac{d^2 heave(t_i)}{dt^2} - 40 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \frac{d^2 pitch(t_i)}{dt^2} \end{aligned} \quad (40)$$

Como consecuencia directa de la reducción en el valor de J se producirá una disminución del MSI, que viene definido por:

$$MSI = 100 \cdot \left[0.5 \pm \operatorname{erf} \left(\frac{\pm \log_{10}(J/g) \mp \mu_{MSI}}{0.4} \right) \right] \quad (41)$$

donde:

$$\mu_{MSI} = -0.819 + 2.32(\log_{10} \omega_e)^2 \quad (42)$$

siendo g la aceleración de la gravedad y ω_e la frecuencia de encuentro.

En la tabla 2 se muestran algunos resultados para variaciones de la velocidad y del nivel de estado de la mar:

Velocidad	SSN=4	SSN=5	SSN=6
20	0.1668	0.33015	0.42609
30	0.17026	0.48296	0.56631
40	0.32889	0.62026	0.67947

Tabla 2: Valor máximo del MSI/100 obtenidos mediante la simulación de la dinámica vertical del buque sin actuadores a distintas velocidades y SSN. ^[2]

Añadiendo los actuadores y utilizando el control adecuado, se debe reducir en la medida de lo posible el valor máximo del MSI, con respecto al caso cuando no se consideran los actuadores.

3.2.3 Diseño de los controladores

Esquema de control utilizado

Se utiliza un control de tipo PD sobre el movimiento de arfada y el movimiento de cabeceo como el que se muestra en la Figura 15:

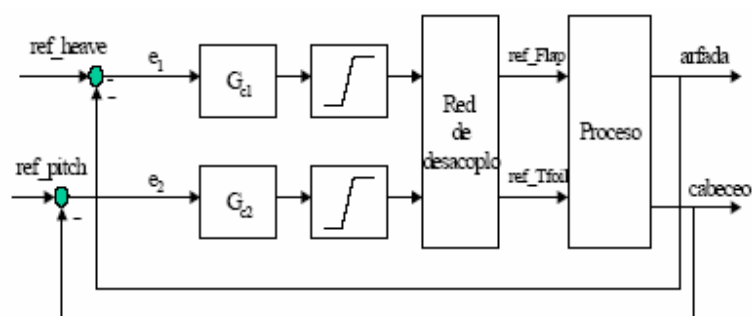


Figura 15: Esquema de control utilizado. ^[2]

Se utilizan dos controladores G_{C1} y G_{C2} de tipo PD cuyas funciones de Transferencia son de la forma:

$$G_c = K_P \left[1 + \frac{T_D s}{\alpha T_D s + 1} \right] \quad (43)$$

Para la acción derivativa se ha utilizado un filtro derivativo con $\alpha=0.1$, con lo que operando se obtiene que las expresiones de las funciones de transferencia G_{C1} y G_{C2} son:

$$\begin{aligned} G_{C1} &= K_{P1} \left[\frac{1 + 1.1 T_{D1} s}{0.1 T_{D1} s + 1} \right] \\ G_{C2} &= K_{P2} \left[\frac{1 + 1.1 T_{D2} s}{0.1 T_{D2} s + 1} \right] \end{aligned} \quad (44)$$

Los emparejamientos entrada-salida son los siguientes:

- El regulador G_{C1} tiene como entrada el error e_1 que se define como la diferencia entre la referencia para el movimiento de arfada (0 m) y el valor medido del movimiento de arfada. Tras pasar por el bloque de saturación la salida de G_{C1} está comprendida en el intervalo $[0^\circ, 15^\circ]$ que son los límites de la posición del alerón (Flap).
- El regulador G_{C2} tiene como entrada el error e_2 que se define como la diferencia entre la referencia para el movimiento de cabeceo (0°) y el valor medido del movimiento de cabeceo. Tras pasar por el bloque de saturación la salida de G_{C2} está comprendida en el intervalo $[-15^\circ, 15^\circ]$ que son los límites de la posición de la hoja en T (T-foil).

Sintonía de los controladores.

Las ganancias K_P y las constantes derivativas T_D se obtienen minimizando J:

$$J(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |acv40(\theta, t_i)| \quad (45)$$

donde θ es el vector de parámetros de los controladores G_{C1} y G_{C2} :

$$\theta = [K_{P1}, T_{D1}, K_{P2}, T_{D2}]^T \quad (46)$$

El problema de optimización no lineal a resolver consiste en la obtención del vector de parámetros θ_{opt} que minimice la función de costo J .

$$J(\theta_{opt}) = \min_{\theta \in S} J \quad (47)$$

Donde S es el rango de valores permitidos para las componentes de θ :

$$S = \{ 1 = K_{P1} = 30 ; 0.1 = T_{D1} = 3 ; \\ 1 = K_{P2} = 15 ; 0.1 = T_{D2} = 3 \}$$

La selección del rango S para las componentes de θ se realizó tras una primera etapa de ensayos de prueba y error atendiendo a los siguientes criterios:

- Los polos de G_{C1} y de G_{C2} deben ser estables.
- Se han fijado el valor máximo de las constantes proporcionales K_{P1} y K_{P2} a un valor 30 y de 15 respectivamente, para evitar una saturación excesiva de los actuadores.
- Se han fijado el valor máximo de las constantes derivativas T_{D1} y T_{D2} a 3, para evitar una saturación excesiva de los actuadores.

El método de sintonía consta de los siguientes pasos:

1. Tras fijar el estado de la mar (SSN) y la velocidad del buque (V) nominal, se selecciona la serie temporal de altura de olas correspondiente.
2. Se selecciona un valor inicial θ_0 para el vector de parámetros, que se encuentre comprendido dentro del rango S .
3. Se ejecuta la función de optimización no lineal que minimiza la función de costo.
4. La función termina su ejecución cuando converge al valor óptimo θ_{opt} o cuando se supera el número máximo de iteraciones.

La función de optimización requiere en cada una de sus iteraciones evaluar la función de costo un número variable de veces. En cada una de estas evaluaciones se ejecuta una simulación en Simulink®.

3.2.4 Estudio de la disminución del índice de mareo con posiciones fijas de los actuadores

Dado una pareja de valores de velocidad del buque y estado de la mar, se desea encontrar aquella posición de los actuadores, prescindiendo de control, para la que se obtiene un porcentaje de reducción mayor en el valor máximo del MSI.

Se realizó un barrido de simulaciones, con un paso de 1° , para el rango de posiciones posibles de la hoja en T $[-15^\circ, 15^\circ]$ y para el rango de posiciones posibles del Alerón $[0^\circ, 15^\circ]$. En la Tabla 3 se muestra las posiciones del Alerón y de la hoja en T, con las que se consigue un mayor porcentaje de reducción en el valor máximo del MSI para distintas velocidades y SSN.

V (nudos)	SSN=4		SSN=5		SSN=6	
	Fl	Tf	Fl	Tf	Fl	Tf
20	5°	12°	1°	-6°	2°	0°
30	0°	-15°	2°	6°	10°	2°
40	2°	-9°	12°	14°	4°	-2°

Tabla 3: Posiciones del Flap (Fl) y del T-Foil (Tf) con las que se consigue un mayor porcentaje de reducción en el valor máximo del MSI. ^[2]

Velocidad	SSN=4	SSN=5	SSN=6
20	11.68 %	5.56 %	2.56 %
30	11.91 %	7.04 %	3.47 %
40	10.07 %	6.79 %	3.54 %

Tabla 4: Porcentaje de reducción en el valor máximo del MSI/100 que se obtiene simulando con las posiciones de los actuadores de la Tabla 3. ^[2]

3.2.5 Resultados obtenidos

En las Tablas 5, 6 y 7 se muestran los vectores θ_{opt} obtenidos tras aplicar el método de sintonía al esquema de control propuesto para distintas velocidades y estados de la mar.

Velocidad (nudos)	$\theta_{opt}=[K_{F1}, T_{D1}, K_{F2}, T_{D2}]$
20	[2.5449, 1.1508, 5.5944, 2.568]
30	[12.485, 1.5747, 11.605, 1.8292]
40	[1.1323, 0.4018, 7.7953, 1.2641]

Tabla 5: θ_{opt} obtenidos para distintas velocidades y estado de la mar 4. ^[2]

Velocidad (nudos)	$\theta_{opt}=[K_{F1}, T_{D1}, K_{F2}, T_{D2}]$
20	[10.528, 0.8395, 7.6515, 1.9154]
30	[1.0725, 0.1553, 5.3702, 1.6734]
40	[21.185, 0.1, 3.4443, 1.8075]

Tabla 6: θ_{opt} obtenidos para distintas velocidades y estado de la mar 5. ^[2]

Velocidad (nudos)	$\theta_{opt}=[K_{P1}, T_{D1}, K_{P2}, T_{D2}]$
20	[5.0414, 0.1249, 14.917, 0.8958]
30	[6.3795, 0.1, 6.2094, 1.3165]
40	[13.585, 0.3396, 3.3321, 1.2171]

Tabla 7: θ_{opt} obtenidos para distintas velocidades y estado de la mar 6. ^[2]

En la Tabla 8 se muestra el porcentaje de reducción en el valor máximo del MSI/100 para distintas velocidades y estados de la mar (SSN) utilizando el esquema de control propuesto.

Velocidad (nudos)	SSN=4	SSN=5	SSN=6
20	32.05 %	17.02 %	10.21 %
30	42.13 %	19.52 %	11.37 %
40	34.92 %	15.59 %	8.12 %

Tabla 8: Porcentajes de reducción del valor máximo del MSI/100 obtenido utilizando el esquema de control propuesto para distintas velocidades y estados de la mar. ^[2]

En las figuras 16, 17 y 18 se representa para las aceleraciones sufridas con distintas velocidades y niveles de la mar, el MSI/100 que se obtiene mediante simulación para: (a) El proceso sin actuadores. (b) El proceso con los actuadores en posición fija. (c) El proceso controlado.

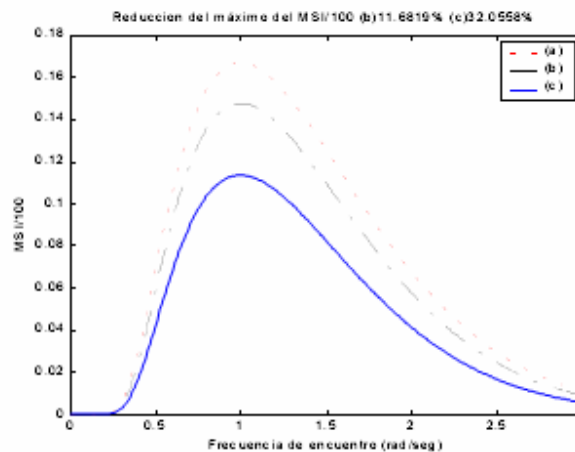


Figura 16: MSI/100 obtenido en: (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija $ref_Flap=5^\circ$ y $ref_Tfoil=12^\circ$. (c) el proceso controlado. $V=20$ nudos $SSN=4$. ^[2]

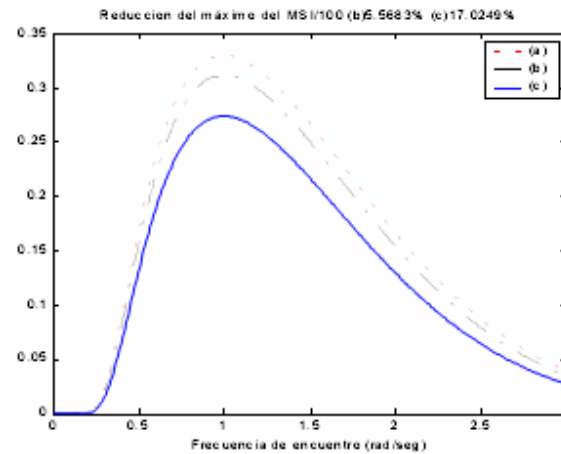


Figura 17: MSI/100 obtenido en: (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija $\text{ref_Flap}=1^\circ$ y $\text{ref_Tfoil}=-6^\circ$. (c) el proceso controlado. $V=20$ nudos $\text{SSN}=5$.^[2]

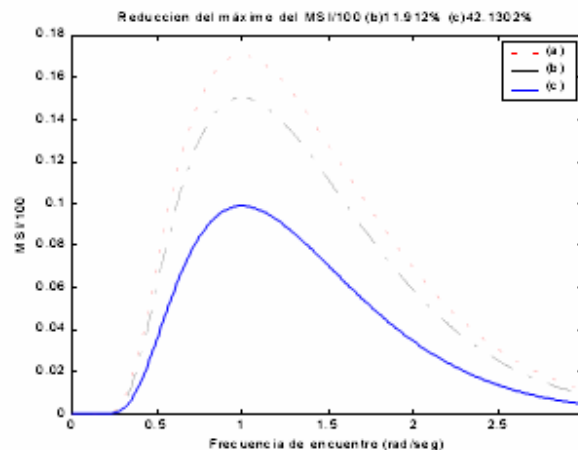


Figura 18: MSI/100 obtenido en: (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija $\text{ref_Flap} = 0^\circ$ y $\text{ref_Tfoil} = -15^\circ$. (c) el proceso controlado. $V=30$ nudos $\text{SSN}=4$.^[2]

Es posible fijar un mismo vector de parámetros para todos los pares de condiciones de velocidad del buque y estado de la mar, sin que se produzca un empeoramiento excesivo del porcentaje de reducción del valor máximo del MSI/100. Por ejemplo si se toma el vector $\theta = [12.485, 1.5747, 11.605, 1.8292]^T$ que se obtiene para $V=30$ nudos y $\text{SSN}=4$ y se simula para el resto de velocidades y estados de la mar se obtiene los resultados que se muestran en la Tabla 9.

Velocidad	SSN=4	SSN=5	SSN=6
20	31.99 %	16.86 %	10.15 %
30	42.13 %	14.85 %	10.21 %
40	28.90 %	11.59 %	7.85 %

Tabla 9: Porcentajes de reducción del valor máximo del MSI/100 obtenido utilizando el esquema de control propuesto y fijando $\theta = [12.485, 1.5747, 11.605, 1.8292]^T$ para distintas velocidades y SSN. ^[2]

3.2.6 Conclusiones sobre la aplicación

En este informe se ha presentado el diseño de un control PD sobre el movimiento de arfada y el movimiento de cabeceo en un buque de alta velocidad a las velocidades de 20, 30 y 40 nudos y estado de la mar 4, 5 y 6. Con este diseño se ha conseguido una disminución de las aceleraciones verticales que sufre el buque y por consiguiente del MSI (motion sickness incidence).

Los parámetros obtenidos para los controladores G_{C1} y G_{C2} son distintos para cada pareja de valores del estado de la mar y de la velocidad del buque como se puede ver en las Tablas 5, 6 y 7, de esta forma se tiene un esquema de ganancias programadas.

En la Tabla 8, se observa que los mayores porcentajes de reducción en el valor del MSI/100 se obtienen para estado de la mar 4 y los menores porcentajes de reducción en el valor del MSI/100 se obtienen para el estado de la mar 6. Esto se debe a que cuanto menor es el estado de la mar menores son las aceleraciones verticales que se inducen en el plano vertical causantes del mareo y la acción de los actuadores es más efectiva al tener que compensar unas fuerzas y momentos inducidos por el oleaje menores.

La saturación de los actuadores aumenta conforme aumenta el estado de la mar, ya que al aumentar el estado de la mar mayores son las fuerzas y momentos inducidos en el plano vertical por el oleaje y mayores deben ser las fuerzas y momentos que ejerzan los actuadores.

De la comparación de la Tabla 4 con la Tabla 8 se deduce la conveniencia de aplicar una estrategia de control. El porcentaje de reducción en el valor máximo del MSI/100 es mayor si se utiliza el esquema de control propuesto que si se dejan los actuadores en una posición fija.

El comportamiento fuertemente perturbado del proceso a controlar impide la utilización de gran parte de los métodos clásicos de sintonía de controladores PD, por eso se ha utilizado un método de sintonía basado en la optimización de una función de costo no lineal que simula el proceso utilizando como entrada las series temporales de oleaje que fueron obtenidas en el CEHIPAR (canal de experiencias hidrodinámicas de El Pardo).

El esquema de control propuesto es una primera aproximación al problema de obtener una reducción en el índice de mareo. En esta misma línea de diseño se puede probar a utilizar controladores basados en redes de primer orden, redes de segundo orden, etc.

3.3 Control Clásico Multivariable De Un Ferry Rápido^[1]

Hoy en día los ferries de alta velocidad, no son únicamente un medio de transporte si no que sean convertido en toda una plataforma de entretenimiento y diversión. Es por ello que la comodidad y bienestar de los pasajeros, adquiere una gran importancia. En este sentido disminuir el mareo que alguno de sus ocupantes pueda sentir es un problema que se resuelve mediante la utilización de controladores clásicos.

Así mismo ahora se hará referencia al estudio que realizaron: Aranda J y otros [1], quienes enfocaron sus esfuerzos a la disminución del índice de mareo MSI (Motion Sickness Incidence o porcentaje de personas que vomitan dentro de las dos horas), el mareo esta directamente relacionado con los movimientos de balance, cabeceo y arfada del buque. En su trabajo presentaron un análisis comparativo de cómo este índice disminuía, conforme se utilizaban diferentes controladores clásicos multivariables (PD, red de primer orden y red de segundo orden) sintonizados mediante un algoritmo genético y un algoritmo clásico de optimización no lineal.

El control del balance no es problemático, sin embargo, los constructores de ferries están también interesados en conseguir un aumento de la atenuación de los movimientos de arfada y cabeceo. Para resolver este problema se debe de considerar actuadores apropiados controlados con un diseño adecuado. Previamente, se deben de desarrollar modelos de la dinámica vertical del ferry para el diseño, la evaluación y la verificación de los resultados.

Una vez terminada la etapa de modelado de la dinámica vertical del ferry y de sus actuadores, la siguiente etapa es diseñar un control sobre el movimiento de arfada y el de cabeceo que gobierne la posición de los actuadores. El objetivo final es disminuir las aceleraciones verticales responsables del mareo.

En este trabajo se realiza un estudio comparativo de diferentes controladores clásicos multivariables: red de primer orden y red de segundo orden. Utilizando estos diseños se consigue una disminución del índice de mareo.

3.3.1 Modelos Utilizados

Se utilizan los modelos lineales de la dinámica vertical de un buque de alta velocidad descritos en la sección 3.2.1.

3.3.2 Especificaciones

El objetivo consiste en disminuir el índice de mareo MSI, según lo mostrado en la sección 3.2.2

3.3.3 Diseño de los controladores

Esquema de control utilizado

En la Figura 19 se muestra el esquema de control utilizado en el diseño.

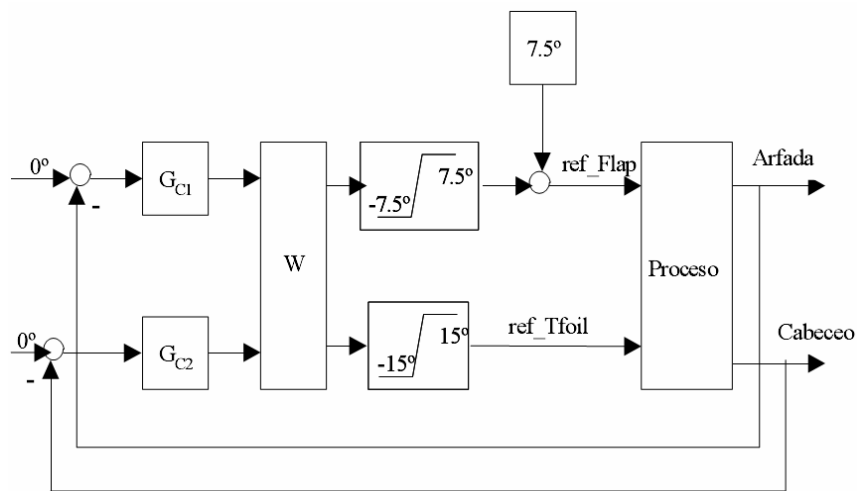


Figura 19: Esquema de control utilizado^[1]

Se utilizaron los siguientes controladores clásicos multivariables: red de primer orden y red de segundo orden.

Redes de primer orden

Las funciones de transferencia de G_{C1} y G_{C2} son:

$$G_{C1} = K_{C1} \frac{s + z_{C1}}{s + p_{C1}} \quad G_{C2} = K_{C2} \frac{s + z_{C2}}{s + p_{C2}} \quad (48)$$

El vector de parámetros es:

$$\theta = [K_{C1}, z_{C1}, p_{C1}, K_{C2}, z_{C2}, p_{C2}]^T \quad (49)$$

Redes de segundo orden.

Las funciones de transferencia de G_{C1} y G_{C2} son:

$$G_{C1} = K_{C1} \frac{s^2 + A_1 s + B_1}{s^2 + C_1 s + D_1} \quad G_{C2} = K_{C2} \frac{s^2 + A_2 s + B_2}{s^2 + C_2 s + D_2} \quad (50)$$

El vector de parámetros es:

$$\theta = [K_{C1}, A_{C1}, B_{C1}, C_{C1}, D_{C1}, K_{C2}, A_{C2}, B_{C2}, C_{C2}, D_{C2}]^T \quad (51)$$

Sintonía de los controladores.

La sintonía de G_{C1} y G_{C2} consiste en la resolución de un problema de optimización no lineal.

$$J(\theta_{opt}) = \min_{\theta \in S} J \quad (52)$$

Donde J es la aceleración vertical media definida en (45) y S es el rango de valores permitidos para los elementos del vector de parámetros θ . La selección del rango S fue realizada de acuerdo a los siguientes criterios:

- G_{C1} y G_{C2} deben ser estables
- Evitar una saturación excesiva de los actuadores.
- Trabajar dentro del rango de frecuencias de encuentro $\omega_e = [0.1 \ 10]$ rad/seg donde las olas tienen toda la energía que excita al proceso.

Por lo tanto los rangos S seleccionados son:

1) Redes de primer orden

$$S = \{1 \leq K_{C1} \leq 250; \ 0.1 \leq z_{C1} \leq 15; \ 1 \leq p_{C1} \leq 100; \\ 1 \leq K_{C2} \leq 175; \ 0.1 \leq z_{C2} \leq 2; \ 1 \leq p_{C2} \leq 10\} \quad (53)$$

2) Redes de segundo orden

$$S = \{1 \leq K_{C1} \leq 250; \ 0.2 \leq A_{C1} \leq 30; \ 1 \leq B_{C1} \leq 250; \\ 0.2 \leq C_{C1} \leq 50; \ 0.01 \leq D_{C1} \leq 634; \\ 1 \leq K_{C2} \leq 175; \ 0.1 \leq A_{C2} \leq 4; \ 0.01 \leq B_{C2} \leq 29; \\ 0.2 \leq C_{C2} \leq 20; \ 0.01 \leq D_{C2} \leq 125\} \quad (54)$$

El método de sintonía utiliza dos procedimientos diferentes de optimización. En primer lugar un algoritmo genético busca una buena condición inicial para el vector de parámetros y después un algoritmo clásico de optimización no lineal, comenzando con esta condición inicial, calcula el vector de parámetros óptimo.

El algoritmo genético utilizado únicamente resuelve problemas de maximización. Por lo tanto la función de costo (45) debe ser modificada adecuadamente:

$$J_G(\theta) = 5 - J \quad (55)$$

El máximo de J_G es el mínimo de J .

Los parámetros del algoritmo genético son configurados con los siguientes valores:

- Tamaño de la población: 15
- Número máximo de generaciones: 300
- Probabilidad de cruce: 0.8
- Probabilidad de mutación: 0.15

El método de sintonía consta de tres pasos:

1. Se configura el estado de la mar (SSN) y la velocidad del ferry (V) para seleccionar la serie temporal de altura de olas que se va a utilizar para perturbar al sistema.
2. El algoritmo genético se lanza para maximizar la función de costo J_G . Cuando el algoritmo termina, se ha generado un buen vector de parámetros inicial θ_g , con todos sus elementos incluidos dentro del rango S .
3. A continuación y partiendo del vector θ_g calculado en el paso 2, se lanza el algoritmo clásico de optimización no lineal, que finaliza cuando converge al valor óptimo θ_{opt} o cuando se excede un número máximo de iteraciones preestablecido.

En cada iteración, tanto el algoritmo genético como el algoritmo clásico de optimización no lineal requieren evaluar varias veces las funciones de costo J_G y J , respectivamente. Cada evaluación corre una simulación de un modelo Simulink® (modelo del proceso + controladores + red de desacoplo) que es excitado por la serie temporal de altura de ola seleccionada en el paso 1.

3.3.4 Resultados

Las funciones de transferencia de G_{C1} y G_{C2} obtenidas para $V=40$ nudos son:

1) Controladores PD: (Obtenidas a partir de la sección 3.2)

$$G_{C1} = \frac{1.016s + 2.075}{s + 0.0449} \quad G_{C2} = \frac{14.2s + 9.128}{s + 0.1414} \quad (56)$$

2) Redes de primer orden

$$G_{C1} = \frac{228.7s + 29.88}{s + 92.76} \quad G_{C2} = \frac{170.4s + 17.53}{s + 7.687} \quad (57)$$

3) Redes de segundo orden

$$G_{C1} = \frac{41.64s^2 + 59.63s + 2897}{s^2 + 14.17s + 441.8}$$

$$G_{C2} = \frac{170.3s^2 + 385.6s + 518.7}{s^2 + 2.172s + 18.47} \quad (58)$$

En la Figura 20 se muestran los porcentajes de reducción del MSI obtenidos en simulación a $V=40$ y $SSN=4$ utilizando diferentes controladores clásicos multivariables.

En la Figura 21 se muestran los porcentajes de reducción del MSI obtenidos en simulación a $V=40$ y $SSN=5$ utilizando diferentes controladores clásicos multivariables.

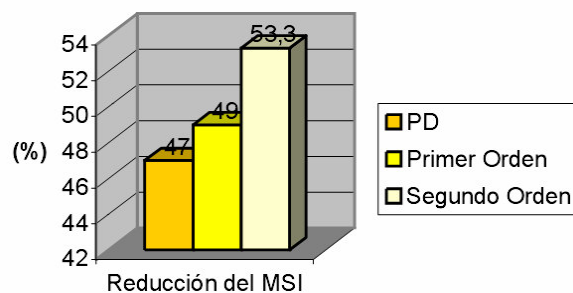


Figura 20: Disminución del MSI obtenido en simulación a $V=40$ nudos y $SSN=4$ utilizando diferentes controladores clásicos multivariables^[1].

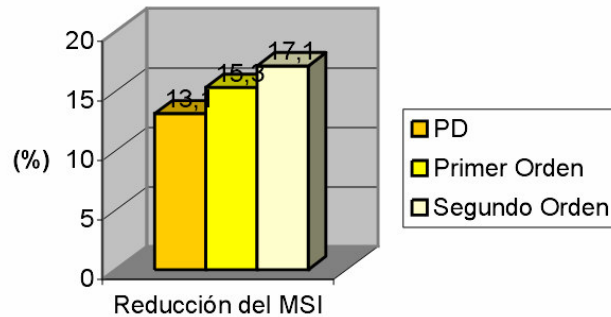


Figura 21: Disminución del MSI obtenido en simulación a $V=40$ nudos y $SSN=5$ utilizando diferentes controladores clásicos multivariables^[1].

3.3.5 Conclusiones sobre la aplicación

Se ha realizado un estudio comparativo de la disminución del índice de mareo (MSI) en un ferry de alta velocidad, utilizando distintos controladores clásicos multivariables (PD, red de primer orden y red de segundo orden).

En la Figura 20 y en la Figura 21 se puede observar que la reducción del índice de mareo es mayor conforme aumenta la complejidad del controlador utilizado. Las máximas reducciones son conseguidas con las redes de segundo orden y las mínimas reducciones con los controladores PD. Este resultado es esperado ya que el número de parámetros ajustables es mayor en las redes de segundo orden que en los controladores PD.

No obstante la diferencia entre ambos tipos de controladores no es excesivamente grande ya que a 40 nudos y $SSN=4$ la diferencia en las reducciones es del 6.3 % mientras que a 40 nudos y $SSN=5$ la diferencia en las reducciones es del 4%.

Por lo tanto cuanto mayor es el estado de la mar, mayor es la aceleración vertical producida por las olas y la acción de los actuadores es menos efectiva ya que tienen que compensar unas fuerzas y unos momentos mayores.

Aunque se utiliza una red de desacoplo, el acoplo existente en el proceso no es aún despreciable ya que la red de desacoplo ha sido diseñada a partir de los modelos lineales de los actuadores, que sólo son válidos si los actuadores no se encuentran en saturación.

3.4 Entorno para el análisis de la robustez de controladores en aplicaciones de control de buques^[3]

Al exponer esta aplicación se desea mostrar la posibilidad de análisis y evaluación del diseño de controladores para una maniobra en específico. En nuestro caso se menciona el desarrollo del control robusto para mejorar el confort de los usuarios de los pasajeros de los grandes buques, como lo son los cruceros, por medio de herramientas computacionales.

En el semestre anterior en la monografía de “Aplicaciones de control en barcos”, se trato como uno de los puntos el control robusto a la maniobra de cambio de rumbo de un buque, por lo que se hace necesario hacer una breve reseña de lo que se desea con el control robusto en un barco, ya que desea en esta ocasión exponer una herramienta de análisis del control robusto utilizando cualquier controlador, y a manera de ejemplo se toma un controlador proporcional derivativo en la aplicación mejoramiento de la aceleración vertical, que es la que provoca mareos en los pasajeros.

El control robusto en la maniobra de cambio de rumbo se aplico para un modelo matemático de un buque en específico. Donde se debe considerar que el modelo matemático del buque es no lineal cuando se realizan variaciones considerables de los parámetros para distintas maniobras de cambio de rumbo, e incluye las limitaciones del ángulo y velocidad del timón.

Este comportamiento no lineal hace difícil el ajuste de los parámetros del controlador para todo el rango de posibles maniobras de cambio de rumbo, la condición anterior mencionada de no linealidad es considerable en cualquier maniobra de mando que se desee dar, ya que el barco esta constantemente sometidos a las condiciones externas, perturbaciones propias del medio, inclemencias del clima: vientos, lluvias, alturas de las olas, entre otras. Por lo que el sistema de control va presentar incertidumbres en los valores que se deseen alcanzar para la variable o variables que se estén controlando.

Ante estas condiciones el proceso físico que se pretenda gobernar se debe cumplir ciertas especificaciones de comportamiento, las que a su vez están limitadas por dichas incertidumbres por lo que se hace necesario recurrir a técnicas de control robusto para el diseño del controlador.

Por lo que se hace necesario de la implementación de herramientas que permitan evaluar el comportamiento de los controladores que fue diseñado bajo las condiciones de control robusto.

Se logro tener acceso la utilización de herramientas de simulación desarrollada en Matlab®–Simulink®, para el análisis de robustez y estabilidad, condiciones que se entre relacionan y que son de suma importancia que se satisfagan para que bajo cualquier condición de operación los parámetros del controlador para realizar de manera satisfactoria el control deseado del sistema controlado.

A continuación se muestra un entorno basado en Matlab®-Simulink® para el análisis de la robustez de controladores diseñados para el control de buques.

Para el cual se utiliza un modelo matemático de un buque para el que se elabora el análisis de robustez y comportamiento en términos de la teoría de análisis μ .

El modelo se ha obtenido a partir del modelo del buque basado en PRECAL⁽¹⁾ y del modelo de los actuadores, obteniéndose la función de transferencia total del buque con entradas los controles de los actuadores y la altura de olas, y como salidas las posiciones y las aceleraciones. Para realizar el análisis normalizan todas las entradas y se señalan los objetivos de comportamiento del sistema. Además se debe indicar que el análisis de comportamiento y robustez para el sistema del buque indicado es controlado con un control clásico multivariable, el cual se expuso en un punto anterior del presente trabajo.

Debido a que uno de los principales objetivos de control es la aceleración vertical del buque con lo que a medida que se pueda controlar se logra una mayor comodidad en los pasajeros, este se va a medir con la utilización del índice de mareo, que se desea reducir cuando se realice el diseño de los respectivos controladores clásicos aplicados en los buques rápidos. Se debe indicar que la disminución del índice de mareo se consigue atenuando los movimientos verticales correspondientes al movimiento de arfada y de cabeceo, para distintas condiciones de la mar. Para ello en el buque se instaló un dispositivo aleta de hoja T (T-foil) , en la proa y de unas aletas en popa (aleros posteriores) dichos dispositivos se muestran en la figura 22. Siempre considerando que un buque es un sistema multivariable complejo que actúa en un medio que introduce una gran cantidad de perturbaciones (olas, vientos, corrientes, aguas poco profundas, etc). Por lo que para el análisis de estabilidad y robustez en una primera fase fue la de modelado tanto de la dinámica como de los actuadores.

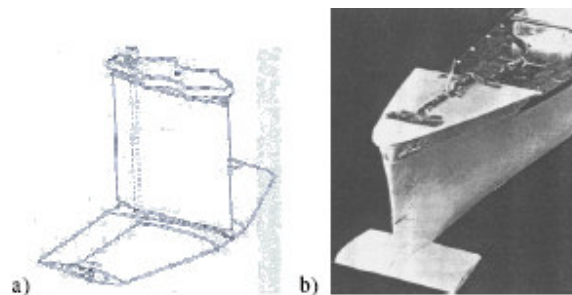


Figura 22. a) Aleta de hoja en T (T-foil) b) Aleta en proa (Flap) ^[8]

En la sección anterior de control clásico multivariable de un ferry rápido se estableció el diseño de varios controladores, se utiliza el desarrollo del método de análisis μ . El cual se utiliza como mecanismo de análisis, creando un método automatizado de análisis posterior al diseño de los controladores, de robustez y funcionamiento de los controladores desarrollados.

El análisis μ de sistemas [3] permite realizar el análisis de sistemas MIMO que presentan incertidumbres estructuradas. Para realizar el análisis es necesario definir las incertidumbres, los objetivos de salida (tanto en objetivos de trayectorias como de esfuerzos), y definir la respuesta en frecuencia de las entradas (tanto de referencia al sistema como a las perturbaciones).

⁽¹⁾ PRECAL: código numérico diseñado para calcular los movimientos y esfuerzos de los sistemas marinos debido al efecto de las olas del mar, además es capaz de calcular velocidades y aceleraciones relativas en distintos puntos del casco, realizar simulaciones de los movimientos del buque.

El método se aplica a un controlador PD multivariable. Este control también se ha verificado experimentalmente en el CEHIPAR (Canal de Experiencias hidrodinámicas de el Pardo, Madrid, España) ^[3].

Para un controlador dado, se determina si el sistema permanece estable para todas las plantas del conjunto de incertidumbres. Si se satisface la estabilidad robusta, se determina lo grande que puede ser la función de transferencia de entradas que son generadas en el exterior a salidas para todas las plantas del conjunto de incertidumbres.

Se considera la diferencia entre los valores de salida del sistema real y el modelo nominal para diseño. Esta diferencia puede ser expresada como incertidumbres estructuradas mediante transformaciones fraccionales lineales ^[3]. Estas incertidumbres incluyen errores de linealización y dinámicas no modeladas.

Análisis de la robustez mediante análisis- μ ^[3]

El valor singular estructurado (MU, μ , SSV o μ) fue introducido para estudiar modelos lineales con incertidumbres paramétricas estructuradas, extendiéndose posteriormente para cubrir incertidumbres paramétricas descritas mediante transformaciones fraccionales lineales (LFTs), además del termino margen de estabilidad multivariable, K_m , para un sistema perturbado diagonalmente como la inversa de μ ,

$$K_m(M) = \mu(M)^{-1} \quad (59)$$

En muchos aspectos esta es una forma más natural de definir un margen de robustez, sin embargo, $\mu(M)$ tiene muchas ventajas, como proporcionar una generalización del radio y la norma espectral.

El punto de arranque para el análisis de la robustez es una representación del sistema en la que las perturbaciones de incertidumbre se sitúan en una matriz diagonal en bloques, la cual se denota por (60).

$$\Delta = \text{diag}\{\Delta_i\} \quad (60)$$

Donde cada Δ_i representa una determinada fuente de incertidumbres.

En la figura 23 se muestra al controlador y la planta generalizada.

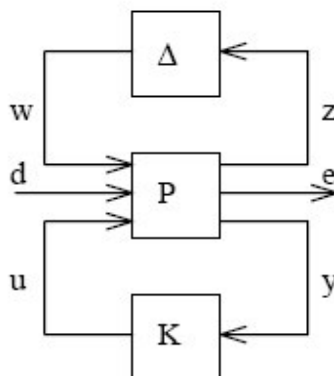


Figura 23: Configuración de control generalizada ^[3].

El controlador se dibuja como un bloque separado, donde se implementa cada uno de los controladores linealizados que se desarrollen. Esta es una forma adecuada para la síntesis del controlador. Si el controlador está dado, y se quiere analizar el sistema, la forma alternativa es la que se muestra en la figura 24.

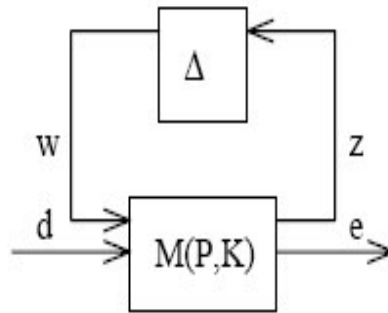


Figura 24: Estructura para análisis de robustez ^[3]

La matriz de respuesta en frecuencia se muestra en la ecuación (61) :

$$M(jw) = \begin{pmatrix} M_{11}(jw) & M_{12}(jw) \\ M_{21}(jw) & M_{22}(jw) \end{pmatrix} \quad (61)$$

Para el análisis de funcionamiento robusto, el sistema de incertidumbre se reformula tal como se muestra en la figura 25.

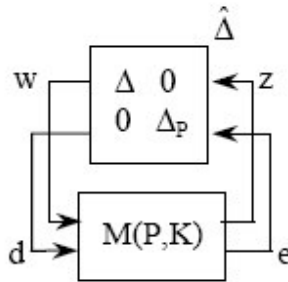


Figura 25 : Estructura para funcionamiento robusto ^[3]

El análisis de estabilidad robusta se basa en el siguiente teorema expresado en (62) :

$$RS \Leftrightarrow \mu_{\Delta}(M_{11}(jw)) < 1 \quad , \quad \forall w \quad (62)$$

Suponiendo estabilidad nominal, el análisis de funcionamiento robusto se basa en el siguiente teorema en la ecuación (63) :

$$RS \Leftrightarrow \mu_{\hat{\Delta}}(M_{11}(jw)) < 1 \quad , \quad \forall w \quad (63)$$

donde μ se calcula con respecto a la siguiente estructura, (64) :

$$\hat{\Delta} = \begin{pmatrix} \Delta & 0 \\ 0 & \Delta_p \end{pmatrix} \quad (64)$$

donde Δ es una matriz diagonal a bloques, su estructura en concreto depende de las incertidumbres que se estén representando, por otro lado Δ_p es siempre una matriz compleja completa.

Modelo lineal para el análisis de la robustez

En las aplicaciones de análisis $-\mu$ es necesario disponer de una descripción de una transformación fraccional lineal (LFT) que contenga todas las linealizaciones de interés dentro de los rangos de los parámetros que se indiquen para el desempeño deseado.

La figura 26 muestra un modelo desarrollado en Simulink® de utilidad para la realización del análisis de robustez. En este esquema el controlador tiene cinco entradas: arfada (heave), ángulo de cabeceo (pitch), aceleración, aceleración angular de cabeceo, y aceleración vertical, las que se representaron en el esquema de barco que se mostró en la figura 1. Además de una entrada adicional correspondiente al ángulo de trimado de las aletas de popa.

- Referencia de arfada.
Variable Medhe.
- Referencia de cabeceo.
Variable Medpi.

Además se tienen las siguientes dos entradas de control:

- Control de T-foil.
Variable T_Foil_c.
- Control de alerones posteriores.
Variable Flap_c.

El significado de las salidas de funcionamiento es el siguiente:

- Las incertidumbres del T-Foil y de las aletas posteriores (flap) corresponden al error que provoca el control debido a las dinámicas no modeladas de la planta. Corresponde a un modelo de incertidumbre multiplicativa. Se representan en la figura 26 por las variables $z1$ y $z2$ respectivamente.
- El error correspondiente a la aceleración a 40m. es el que corresponde al exceso de aceleración vertical a 40 m desde el centro de gravedad a proa. Corresponde a la variable eAcv40.
- El error de posicionamiento bajo el agua del T – foil muestra la posición relativa del T-foil con relación a la superficie del agua para un comportamiento adecuado. Se representa con la variable eUnd.
- Los errores de posicionamiento del T-foil y de las aletas posteriores hacen referencia al ángulo que tiene el actuador con respecto a su posición inicial o por defecto. Corresponden a las variables eTF-Pos y eF-Pos respectivamente.
- Errores de cavitación^(v) para el T-foil y las aletas posteriores, son las señales que indican si los actuadores sufren el fenómeno de la cavitación. Están dadas por las variables eTF_Cav y eF_Cav respectivamente. Dicho fenómeno es tratado en el apéndice B, con el que se desea hacer notar el efecto de este fenómeno en la navegación.
- Los errores de velocidad del T-foil y de los alerones posteriores son las señales que indican lo rápido que es el movimiento de estos actuadores. Corresponden a las variables eTF_Vel y eF_Vel respectivamente.

Las salidas medidas son las indicadas como entrada al controlador y corresponden a:

- Posición vertical o de arfada.
Variable heave.
- Posición del ángulo de cabeceo.
Variable pitch.

^(v) Cavitación, referirse al glosario.

- Aceleración vertical o de arfada.
Corresponde a la variable acvheave.
- Aceleración de cabeceo.
Variable acvpitch.
- Aceleración sufrida a 40 m del centro de gravedad (hacia la proa).
Variable acv40.

Todas las salidas están normalizadas a sus correspondientes valores máximos permitidos. Cuando una señal supera el 1 es una indicación de que está fuera del rango permitido y no cumple con las especificaciones de funcionamiento nominal de operación deseada. Las entradas externas también se han normalizado a los valores máximos que deben tener. También se han calculado los valores de las correspondientes funciones de peso para las entradas y las salidas.

Dichas funciones de peso para las incertidumbres de la aleta de hoja T (T- foil) y de los alerones posteriores se definen de la ecuación (65):

$$M(G, W_u) := \left\{ \tilde{G} : \left| \frac{\tilde{G}(j\omega) - G(j\omega)}{G(j\omega)} \right| \leq |W_u(j\omega)| \right\} \quad (65)$$

$|W_u(j\omega)|$ representa la diferencia del porcentaje potencial máximo entre todas las plantas representadas por $M(G, W_u)$ y el modelo G de la planta nominal.

La planta nominal G es el sistema no lineal que convierte las señales de control de los actuadores a una fuerza de sustentación. \tilde{G} corresponde al sistema lineal con el que se realiza el análisis μ . W_u se obtiene calculando la respuesta en frecuencia de G con una entrada delta al control de la aleta de hoja T. \tilde{G} se obtiene mediante la linealización de G . Después de aplicar las ecuaciones anteriores, se ajusta una función de transferencia de primer orden. El mismo proceso se repite para las aletas posteriores. El resultado es la siguiente función de peso para estos actuadores, expresada en la ecuación (66):

$$W_u = \frac{0.01382 * s + 0.2051}{s + 26.54} \quad (66)$$

De una forma análoga se obtienen las funciones de peso para el estado de la mar.

El estado de la mar se define por la ecuación (67):

$$S(\omega) = \frac{1.25}{4} \frac{\omega_o^4}{\omega^5} H_s^2 e^{\left(-1.25 * \left(\frac{\omega_o}{\omega^5} \right)^4 \right)} \quad (m / s^2) \quad (67)$$

$S(\omega)$ se calcula en el espacio de frecuencias, es un filtro de cuarto orden.

Los ruidos de entrada se midieron y se identificó un filtro de cuarto orden paso alto para los mismos.

Las salidas objetivo se pueden dividir en dos grupos: confort y límites de los sistemas físicos. La primera corresponde a una medida de la aceleración vertical, que se limita a 1 m/s^2 . La segunda corresponde a los límites superiores de los actuadores, y es la inversa de los valores máximos permitidos para los mismos.

Diseño y análisis de un controlador clásico

El control que se ha analizado es un control multivariable PD. En la figura 27 se muestra el diagrama de bloques del sistema que se controla. En este sistema hay dos variables manipuladas, ref_Flap y ref_T-foil, y dos variables controladas (arfada “heave” y cabeceo “pitch”), y una perturbación, que corresponde a la altura de ola, “wave”.

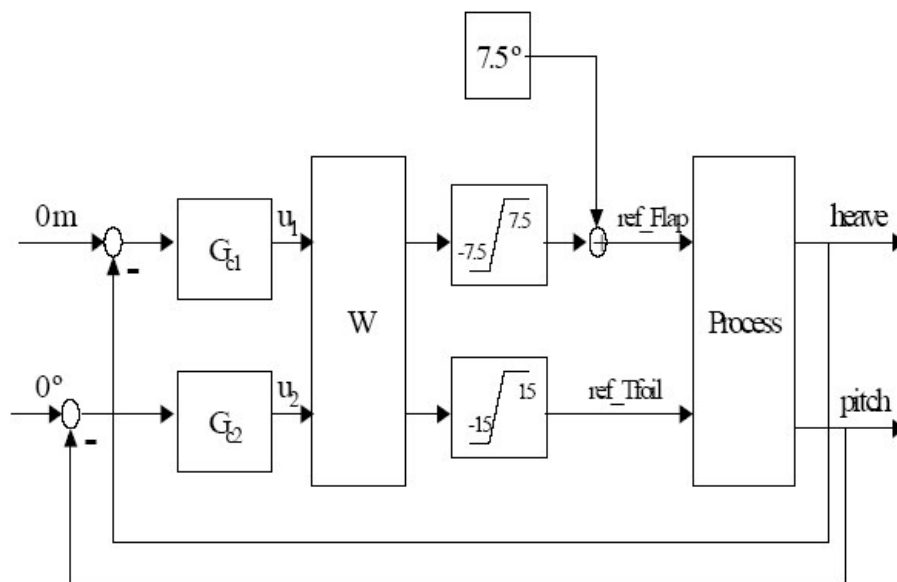


Figura 27: Diagrama de bloques del proceso a controlar ^[3].

El objetivo del control es minimizar una función índice de mareo, descrita por la siguiente ecuación (68):

$$MSI = 100 * \left[0.5 \pm \operatorname{erf} \left(\frac{\pm \log_{10} (J / g) \mp \mu_{MSI}}{0.4} \right) \right] \quad (68)$$

donde

$$\mu_{MSI} = -0.819 + 2.3(\log_{10} \omega_e)^2 \quad (69)$$

g es la aceleración de la gravedad y ω_e es la frecuencia de encuentro del buque con las olas.

El controlador se sintoniza resolviendo un problema de optimización no lineal dado por la siguiente expresión de la ecuación (70):

$$J(\theta_{opt}) = \min_{\theta \in S} J \quad (70)$$

donde J es la aceleración vertical media definida según la ecuación (71) :

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{d^2 heave(t_i)}{dt^2} - 40 * \frac{\pi}{180} * \frac{d^2 pitch(t_i)}{dt^2} \right| \quad (71)$$

Se debe aclarar que la ecuación (71) se expreso con sus términos en ingles ya que estos son variables de análisis, además anteriormente se indico a que variable del comportamiento corresponden en el buque. En la figura 27 se muestra el esquema del diagrama de bloques utilizado para el diseño del control. W es un filtro de desacoplo.

El funcionamiento nominal del buque es a 40 nudos, para estas condiciones, las funciones de transferencia del control corresponden a las expresiones de las ecuaciones (72) y (73):

$$G_{C1} = \frac{1.016 * s + 2.075}{s + 0.0449} \quad (72)$$

$$G_{C2} = \frac{14.2 * s + 9.128}{s + 0.1414} \quad (73)$$

En análisis se ha realizado para este controlador PD. Se ha calculado la respuesta en frecuencia, y se han aplicado las herramientas μ a la misma. Como se está interesado en la disminución del mareo en el pasajero, se ha calculado la función de índice de mareo (MSI) en todos los puntos de frecuencia.

En las siguientes figuras (28 a la 31) se muestran los resultados del análisis para una velocidad del buque de 40 nudos y suponiendo un estado de la mar (SSN) de 4^(VI).

Los resultados se pueden resumir en los siguientes puntos:

- En la figura 28 se encuentra la gráfica del comportamiento robusto, mostrándose que esta condición (para este controlador) no se verifica puesto que siempre es mayor de uno, valor que sale de la normalización establecida al principio del análisis.
- En la figura 29 se muestra la gráfica para el análisis de estabilidad robusta, en ella se ve que está por debajo de 1, por lo que el sistema presenta estabilidad robusta, siendo el

^(VI) Estados de la mar, ver tabla del apéndice A.

valor suficientemente bajo. Ello significa que es necesario grandes variaciones de la planta para llegar a la inestabilidad.

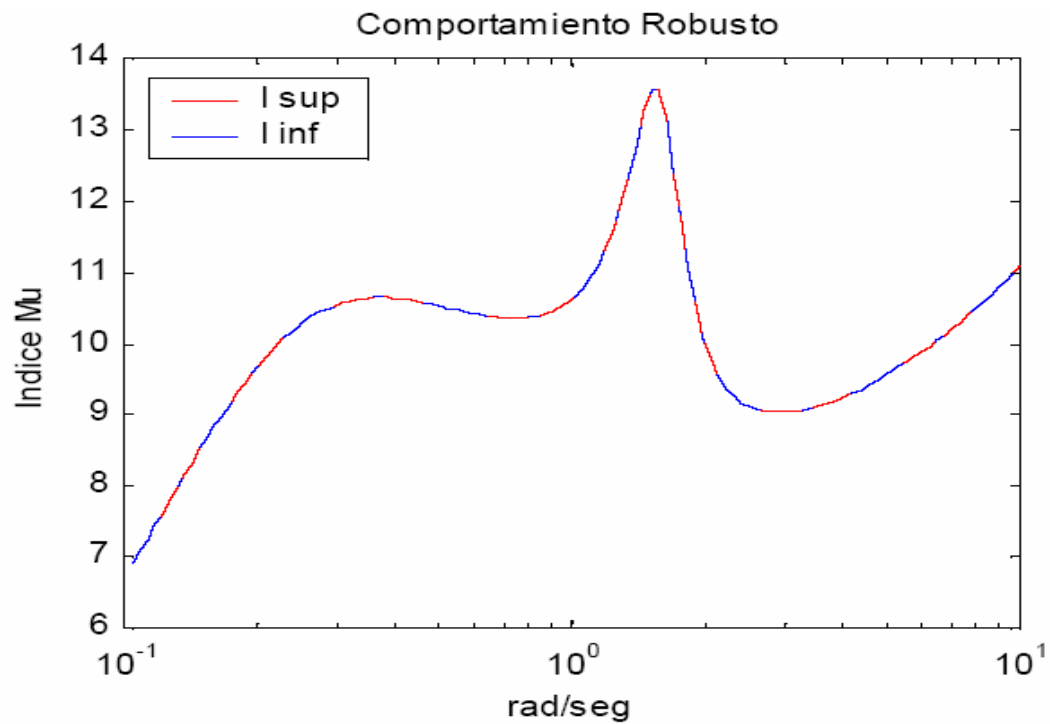


Figura 28: Análisis del comportamiento robusto de buque controlado bajo la influencia del control PD ^[3].

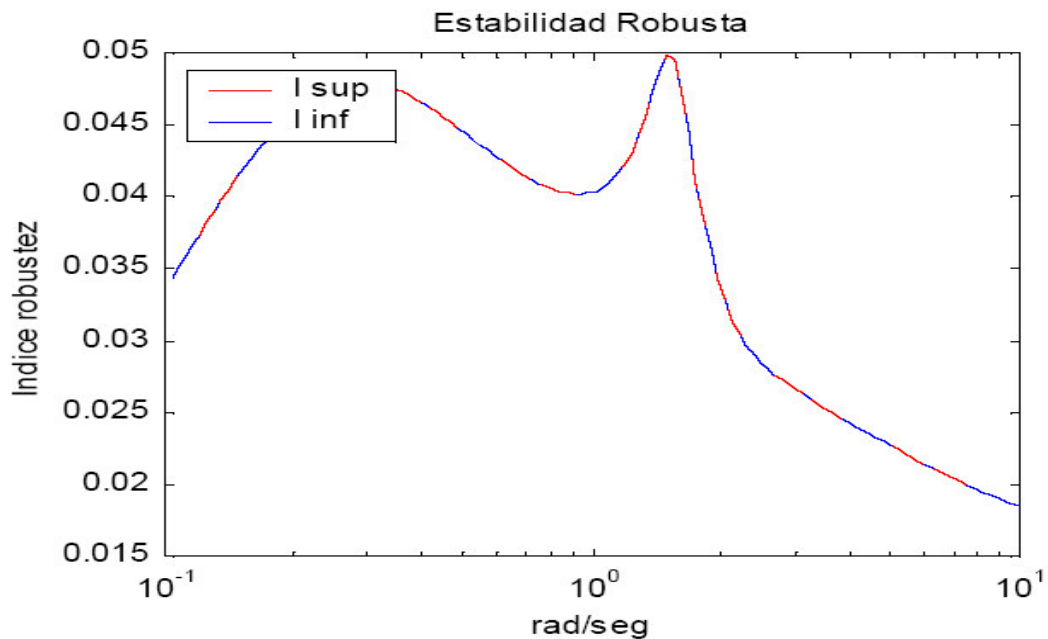


Figura 29: Análisis de la estabilidad robusta de buque controlado bajo la influencia del control PD ^[3].

- La figura 30 corresponde al comportamiento nominal, que también está por encima de 1, quedando además muy lejos de los valores aceptables, lo cuál también se refleja en el análisis del comportamiento robusto.

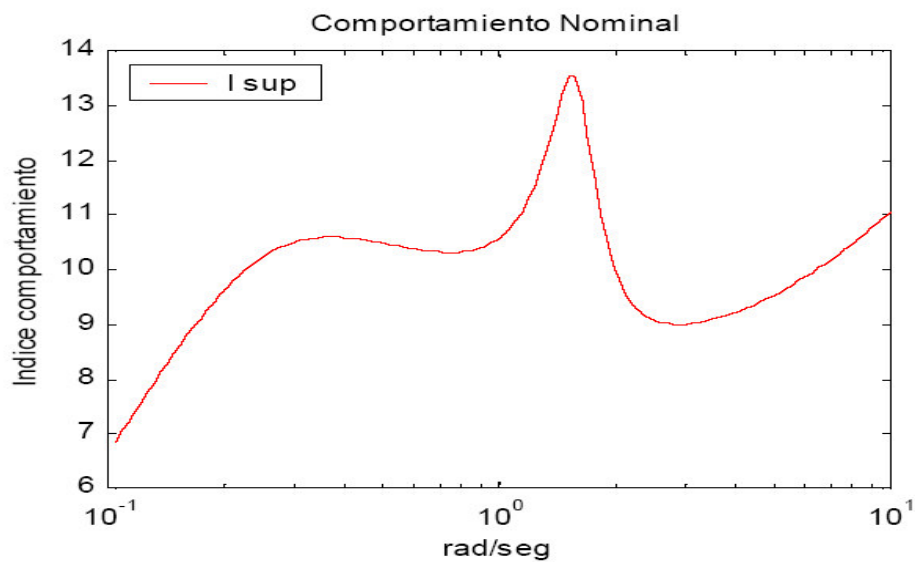


Figura 30: Análisis del comportamiento nominal del buque ^[3].

- La última gráfica, la que se muestra en la figura (31) corresponde al índice de mareo MSI, el cuál es muy inferior al caso de no tener control. De hecho el control se ha definido para su reducción.

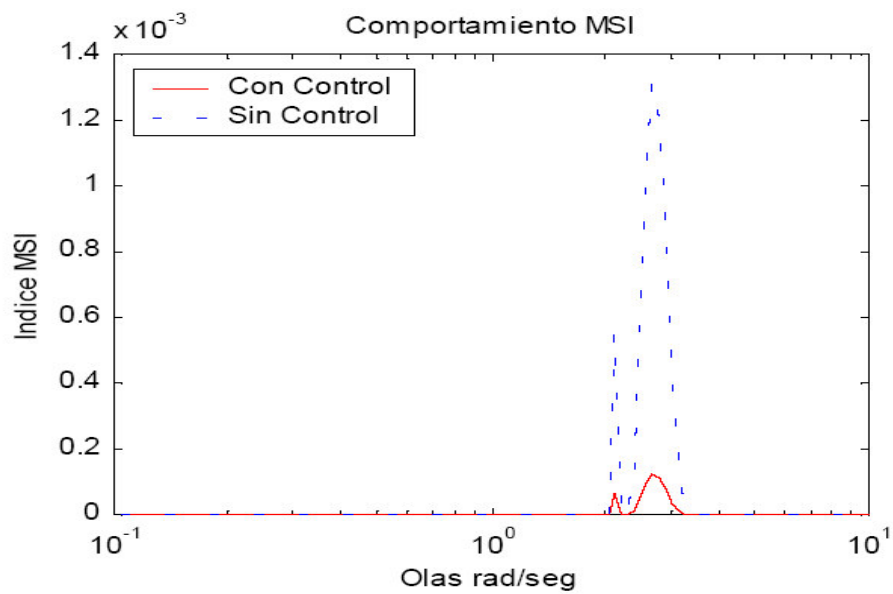


Figura 31: Análisis del comportamiento MSI del buque controlado bajo la influencia del control PD ^[3].

4.0 Conclusiones

Se ha presentado el diseño de un control PD sobre el movimiento de arfada y el movimiento de cabeceo en un buque de alta velocidad a las velocidades de 20, 30 y 40 nudos y estado de la mar 4, 5 y 6, Con el cual se ha conseguido una disminución de las aceleraciones verticales que sufre el buque y por consiguiente del MSI (motion sickness incidence).

Los parámetros obtenidos para los controladores G_{C1} y G_{C2} son distintos para cada pareja de valores del estado de la mar y de la velocidad del buque.

Los mayores porcentajes de reducción en el valor del MSI/100 se obtienen para estado de la mar 4. Esto se debe a que cuanto menor es el estado de la mar menores son las aceleraciones verticales que se inducen en el plano vertical causantes del mareo y la acción de los actuadores es más efectiva al tener que compensar fuerzas y momentos inducidos por el oleaje menores.

La saturación de los actuadores aumenta conforme aumenta el estado de la mar, ya que al aumentar el estado de la mar mayores son las fuerzas y momentos inducidos en el plano vertical por el oleaje y mayores deben ser las fuerzas y momentos que ejerzan los actuadores.

Se deduce la conveniencia de aplicar una estrategia de control. El porcentaje de reducción en el valor máximo del MSI/100 es mayor si se utiliza el esquema de control PD propuesto en 3.2 que si se dejan los actuadores en una posición fija.

El comportamiento fuertemente perturbado del proceso a controlar impide la utilización de gran parte de los métodos clásicos de sintonía de controladores PD, por eso se ha utilizado un método de sintonía basado en la optimización de una función de costo no lineal que simula el proceso.

Se ha realizado un estudio comparativo de la disminución del índice de mareo (MSI) en un ferry de alta velocidad, utilizando distintos controladores clásicos multivariantes (PD, red de primer orden y red de segundo orden).

La reducción del índice de mareo es mayor conforme aumenta la complejidad del controlador utilizado. Las máximas reducciones son conseguidas con las redes de segundo orden y las mínimas reducciones con los controladores PD, debido a que el número de parámetros ajustables es mayor en las redes de segundo orden que en los controladores PD.

No obstante la diferencia entre ambos tipos de controladores no es excesivamente grande ya que a 40 nudos y SSN=4 la diferencia en la reducciones es del 6.3 % mientras que a 40 nudos y SSN=5 la diferencia en las reducciones es del 4%.

Aunque se utiliza una red de desacoplo, el acoplo existente en el proceso no es aún despreciable ya que la red de desacoplo ha sido diseñada a partir de los modelos lineales de los actuadores, que sólo son válidos si los actuadores no se encuentran en saturación.

Se ha mostrado el desarrollo de una herramienta gráfica en Matlab® - Simulink®, teniendo como fundamento matemático el análisis $-\mu$, para evaluar la robustez de los controladores desarrollados para el control multivariable que se ve sometida la dinámica vertical del buque, la causante de los mareos de los pasajeros.

Después de la evaluación del comportamiento por medio de la herramienta desarrollada para un controlador PD, verifica las condiciones de estabilidad robusta, pero no las de comportamiento robusto, ya que algunas variables, como la posición de la aleta de hoja en T (T-foil) o de las aletas posteriores y los errores de cavitación de estos actuadores, son mayores que los valores máximos permitidos.

No obstante, se verifica la condición de diseño relativa al índice de mareo (MSI). Este entorno permite disponer de una herramienta de validación y comparación de los distintos diseños que se realizan para este problema.

Por lo que durante este trabajo se reafirma la utilidad de las herramientas computacionales para el análisis del comportamiento de los sistemas reales post - diseño de los controladores con los que desea conseguir un comportamiento específico, como lo es la aplicación del control de barcos, la reducción del índice de mareo y logrando un mayor confort de los pasajeros, que son la razón de ser de gran número de empresas navieras - turísticas alrededor del mundo.

5.0 Bibliografía

1. Aranda J., Díaz J.M., Ruipérez P. y De La Cruz J. M. Control clásico multivariable de un ferry rápido Dept. de Aranda, Informática y Automática. UNED. Madrid, España. 2003.
2. Aranda J, Díaz J.M., Ruipérez P. y De La Cruz J. M. Disminución del índice de mareo mediante un control PD sobre el movimiento de arfada y el ángulo de cabeceo en un buque de alta velocidad. Dept. de Aranda, Informática y Automática. UNED. Madrid, España. 2002.
3. Aranda J. Revilla J, Díaz J y Muñoz R . Entorno para el análisis de la robustez de controladores en aplicaciones de control de buques. Dept. de Informática y Automática. UNED. España. 2004.
4. Gianni C. Enciclopedia del mar y de la navegación. Editorial Noguer. SA. Barcelona. 1970.
5. Martínez J. Mº. Diccionario náutico. Ediciones Garriga. SA. Barcelona.
6. Pérez T. y Blanke M. Mathematical Ship Modeling for Control Applications. University of Newcastle, Australia.
7. Rueda T., Velasco F., Nanclares J., Valverde C., Cicuéndez D. y Pérez N. Entorno Gráfico para el control del gobierno de un buque. Universidad de Cantabria, España. 2003.
8. Segundo E., Besada E., Girón J., Toro B. y De la Cruz J. Control multiobjetivo de un ferry de alta velocidad. Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática, España. 2004.
9. Steller J., Alvarado M. y Picado A. Aplicaciones de control en barcos. Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Eléctrica, San Pedro Montes de Oca, Costa Rica. 2005
10. Velasco F., Rueda T., López E. y Moyano E. Modelos matemáticos para el control de gobierno de buques. Universidad de Cantabria, España. 2004.
11. Tabla resumen estados de la mar:
 - i. <http://www.mailxmail.com/curso/excelencia/meteorologia/capitulo30.htm>

6.0 Apéndices

6.1 Apéndice A

Resumen de la Escala Internacional para clasificar el estado del mar ^[11].

Grado	Denominación	Estado correspondiente al viento en nudos	Indicaciones aproximadas para poderlo clasificar	Altitud de olas en metros
0	Calma	0	Mar perfectamente llana	Sin olas
1	Rizada	1-3	Se empiezan a formar pequeñas olas que no llegan a romper	0-0,5
2	Marejadilla	4-10	Se empieza a pronunciar el oleaje que apenas rompe, molestando poco a las embarcaciones menores sin cubierta.	0.5-1
3	Marejada	11-16	Si el oleaje aumenta, en términos de ser de algún cuidado el manejo de embarcaciones menores sin cubierta.	1-2
4	Fuerte marejada	17-21	Si el oleaje aumenta, en términos de ser de algún cuidado el manejo de embarcaciones menores sin cubierta	2-3
5	Gruesa	22-27	Aumenta aún más el volumen de las olas, haciendo peligrosa la navegación de las embarcaciones menores con cubierta. La espuma blanca de las rompedientes de las crestas, empieza a ser arrastrada en la dirección del viento. Aumentan los rociones.	3-4
6	Muy gruesa	22-33	En las anteriores condiciones aumentan aun más el volumen de las olas. Los rociones dificultan la visibilidad.	4-6
7	Arbolada	34-47	Aumentan los caracteres anteriores. La espuma se aglomera en grandes bancos y se arrastra en la dirección de viento en forma espesa.	6-9
8	Montañosa	48-63	Olas excepcionales grandes sin dirección determinada como pueden observarse en el vórtice de un ciclón. Los buques de pequeño y medio tonelaje se pierden de vista.	6-14
9	Enorme	>64	Aumentan los caracteres anteriores	>14

6.2 Apéndice B

Cavitación ^[8]

El fenómeno de la cavitación consiste en la aparición de burbujas de vacío en la cara de la aleta opuesta al flujo, véase figura 32.

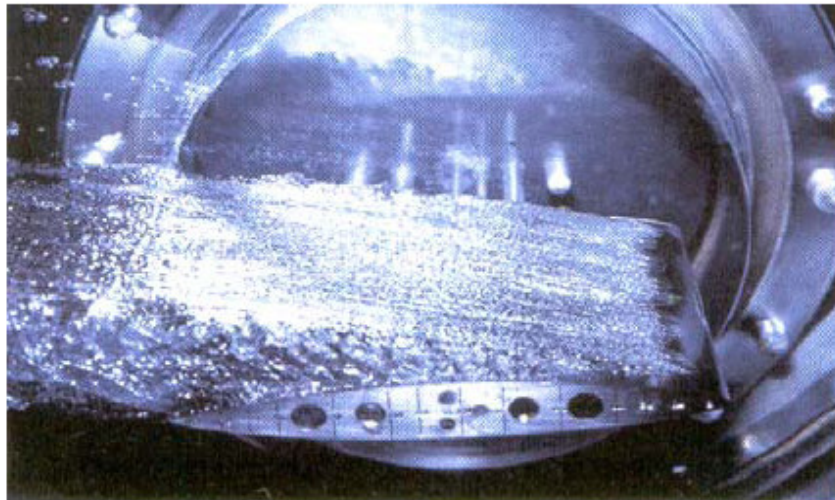


Figura 32: Fenómeno de la cavitación ^[8].

Estas burbujas fatigan el material muy rápidamente, destruyendo la aleta. Es necesario evitar este fenómeno para reducir el costo de mantenimiento del barco, ya que cada vez que el barco debe entrar en dique seco supone grandes pérdidas para las navieras. Este fenómeno aparece cuando se dan condiciones de baja presión, aletas cercanas a la superficie, altas velocidades, altos ángulos de ataque y grandes dimensiones de los actuadores. La figura 33 muestra la cavitación como función del ángulo de ataque y de la velocidad del fluido.

Figura.33. Curva de cavitación. Se han definido dos índices J2 y J3 que miden la cavitación en la aleta de hoja T (T-foil) y en los aletas o alerones (flaps).

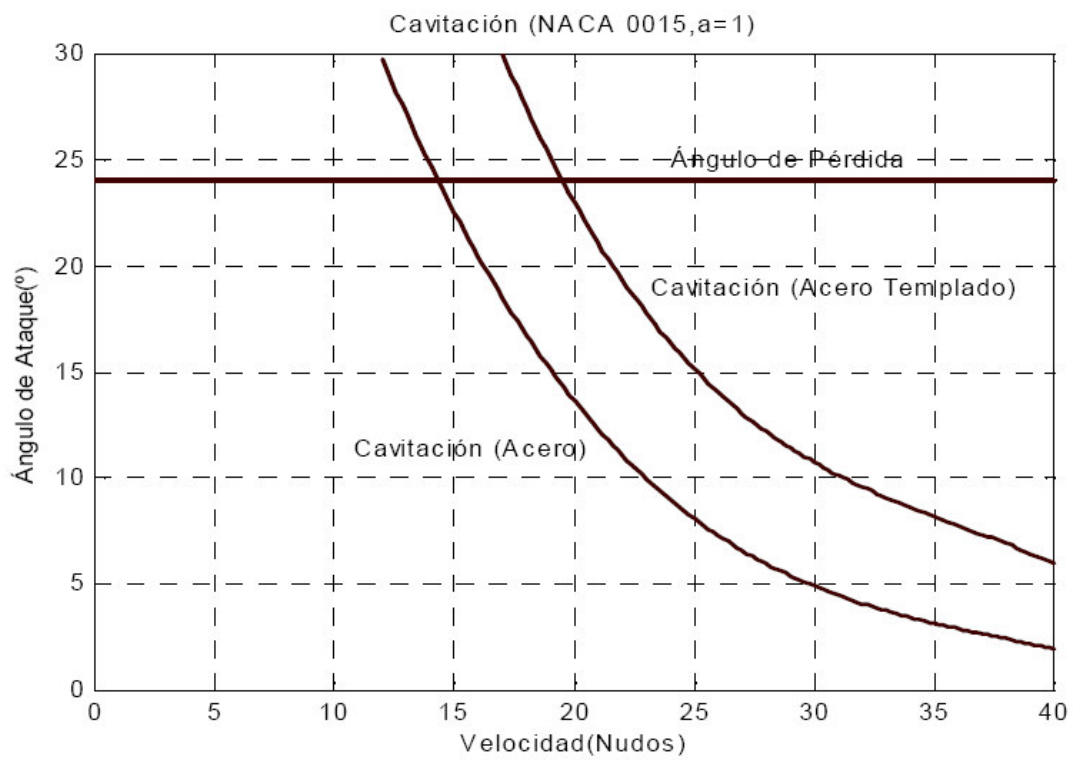


Figura 33: Curva de cavitación ^[8].

7.0 Glosario ^{[4]y[5]}

- Arfar: Levantar la proa del buque por efecto de la marejada. A veces se usa para referirse al movimiento de subir y bajar la proa, es decir, cabecear.
- Asiento: posición del barco o de una embarcación adoptada en el agua como consecuencia de la distribución de los pesos que hay a bordo.
- Babor: Banda o costado izquierdo del buque, mirando de la popa a la proa.
- Cabecear: Movimiento del buque en la dirección proa-popa al subir y bajar alternativamente cada una de estas extremidades.
- Cabeceo: acción de cabecear.
- Cavitación: Fenómeno de formación de un vacío o cavidad en el agua, en la parte activa de la hélice, produciendo en el buque una pérdida de empuje y fuertes vibraciones.
- Ciar: Bogar al revés para que la embarcación vaya hacia atrás y también lograr el propio efecto para la inversión de giro normal de la hélice e hélices.
- Eslora: Longitud de un buque contada de proa a popa.
- Estribor: Banda o costado derecho del buque, mirando de popa a proa.
- Guiñada: giro, separación angular o desvío de la proa de un buque hacia una u otra banda de la dirección o rumbo que debe seguir.
- Giro piloto: Aparato electromagnético que en conexión con un compás acciona el timón para mantener automáticamente al buque sobre un rumbo prefijado.
- Girocompás: Aguja o compás náutico en el que la acción directora es ejercida por un giroscopo con dos grados de libertad y amortiguamiento, para obtener la indicación del norte verdadero.
- Giróscopo : aparato electromagnético constituido por un giróstato, es decir por una mesa rotatoria en suspensión cardan que gira alrededor de su eje principal de inercia. A bordo de grandes transatlánticos de línea, se emplea mucho como estabilizador, con el fin de atenuar los efectos del balanceo cuando hay mar gruesa. Dicese también giroscopio.
- Gobernar: Término marino que equivale a guiar. Comprende todas las maniobras que debe efectuar un barco de vela o de propulsión mecánica para mantener determinado rumbo: gobernar el timón, las velas, etc.

- Pala :
 1. La parte más ancha y delgada del remo en el extremo opuesto al guión, y que es la que se introduce y apoya en el agua al bogar o ciar.
 2. Superficie de acción del timón.
 3. Pala de hélice: cada una de las aletas propulsoras que componen la hélice.
- Piloto automático: Aparato electromecánico para la maniobra automática del timón. Permite que el buque navegue sin desviarse del rumbo preestablecido. Solo se aplica en los giro compases.
- Popa: Frente de la obra que cierra un buque por su extremidad posterior, en la cual se halla el timón. Según su forma recibe distintos nombres: popa llana, popa de falucho, popa de aletas , popa cuadra o cuadrada, popa redonda, popa de crucero, popa de remolcador, popa continua.
- Proa: Parte delantera de un buque, comprendida entre la ultima cuaderna y el tajamar. En sentido figurado se llama también cabeza, hocico y pico según su aspecto exterior o figura se distingue con el nombre proa cerrada, lanzada, redonda, llena, de violín y de gota de agua o bulbo.
- Tajamar: Tablón grueso, enterizo o compuesta de varias piezas que en los buques de madera prolonga el lanzamiento de roda, sirviendo de apoyo a la trincas y barbiquejas y del mascarón.
- Trimado: Variación del asiento.