



CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE
DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

**CONTROL CLÁSICO
DEL MOVIMIENTO VERTICAL
DE UN
BARCO DE ALTA VELOCIDAD
EMPLEANDO
DISTINTOS TIPOS
DE
CONTROLADORES**

Autores:

Bonifacio de Andrés y Toro

Segundo Esteban Sanromán

Jesús Manuel de la Cruz García

José María Girón Sierra

Reports Interno del Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática de la UCM

nº: 16 / 00

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

DOCUMENTO N°: **CRIBAV/ 01-06**

Fecha:

Código SubProyecto:

TÍTULO DEL DOCUMENTO

CONTROL DEL MOVIMIENTO VERTICAL DE UN BARCO DE ALTA VELOCIDAD EMPLEANDO DISTINTOS TIPOS DE CONTROLADORES

Autores:

Bonifacio de Andrés y Toro

Segundo Esteban Sanromán

Jesús Manuel de la Cruz García

José María Girón Sierra

Grupo: Isa de la UCM

Responsable del Grupo: Jesús Manuel de la Cruz

Responsable del Informe: Bonifacio de Andrés y Segundo Esteban

SubProyecto:

Version:

Versión:
Fecha:
SubProy.:

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Lista y Filiación de Autores:

Agradecimientos:

Se agradece la colaboración de Justo Lechuga Martín por su trabajo en la elaboración del simulador móvil del barco.

Lista de distribución:

Resumen:

En este informe se exponen los resultados obtenidos con diferentes estructuras de control clásico. Inicialmente se hace una introducción de los modelos del barco, de los actuadores que se han utilizado y de la función de coste utilizada para sintonizar los controladores. Se realiza un estudio detallado de la influencia de la posición de los actuadores y del flap. Se estudia el caso del PID con gran desarrollo gráfico para familiarizarnos con el comportamiento del controlador que requiere el sistema. Finalmente se exponen resultados para los casos del PID, PD, red de 1º orden y red de 2º orden. Se demuestra que un solo controlador es lo suficientemente robusto para las diferentes situaciones.

Summary:

This internal report explains the application of different classical controllers to the ship benchmark problem. An introduction with the ship and actuators models is included. The cost function used to tuning the controllers is shown. Graphics results show the behaviour of the cost function to the fixed positions of the Flap and T-Foil. A very detailed study of the PID is done; results are shown in an illustrative graphic way. Finally, PID, PD, 1º order transfer function and 2º order transfer function controllers are compared. It is proved that a single controller is robust for change in the simulations conditions, velocity and SSN.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN:	0
2	DISEÑO DEL CONTROL	0
1.-	Mover los actuadores para atenuar lo más posible la aceleración vertical.....	0
3	ACTUADORES	0
4	EXPLICACIÓN DEL CONTROL	0
5	ESTUDIO DE LOS RANGOS DE LOS PARÁMETROS	0
5.1	LA FUNCIÓN DE COSTE	0
5.2	ESTUDIO DEL RANGO PARA UN CONTROLADOR PID	0
5.2.1	<i>Para el controlador del FLAP</i>	0
5.2.2	<i>Para el controlador del T-FOIL</i>	0
	ESTUDIO DE LOS RANGOS DE LOS PARÁMETROS PARA UN PD.....	0
6	RESULTADOS GENERALES	0
6.1	VALOR DE LA FUNCIÓN DE COSTE CON LOS PARÁMETROS OBTENIDOS PARA DISTINTOS TIPOD DE CONTROLADORES	0
7	INFLUENCIA DE LA POSICIÓN DEL T-FOIL Y FLAP	0
7.1	TABLA RESUMEN DE TODOS LOS EXPERIMENTOS.....	0
7.2	TABLA RESUMEN CON EL MSI OBTENIDO Y PORCENTAJE DE MEJORA	0
7.3	UN ÚNICO CONTROLADOR PARA TODO EL CONTROL.....	0
7.4	SISTEMA GRÁFICO PARA LA MEDIDA DEL MSI Y OBSERVACIÓN DEL CONTROL DEL BARCO	
	0	

1 INTRODUCCIÓN:

En los estudios realizados anteriormente por el equipo investigados del Proyecto CRIBAV se desprende la siguiente estructura para los modelos del buque:



Figura 1: Estructura general de los modelos del buque



Figura 2: Modelo gráfico del filtro Olas a Fuerzas y momentos

Modelos Obtenidos: Filtros Olas a Fuerzas y Momentos

Modelo para la velocidad de 20 nudos:

$$G(\text{olas} - \text{fuerzas}) = \frac{0.08994 \cdot s^3 - 0.022932 \cdot s^2 + 0.3828 \cdot s - 0.07297}{s^4 + 0.8817 \cdot s^3 + 1.276 \cdot s^2 + 0.3534 \cdot s + 0.07297}$$

$$G(\text{olas} - \text{momentos}) = \frac{-0.09496 \cdot s^3 + 0.08845 \cdot s^2 - 0.421 \cdot s}{s^4 + 2.541 \cdot s^3 + 3.86 \cdot s^2 + 3.524 \cdot s + 1.244}$$

Modelo para la velocidad de 30 nudos:

$$G(\text{olas} - \text{fuerzas}) = \frac{0.083 \cdot s^3 + 0.01143 \cdot s^2 + 0.6376 \cdot s - 0.1224}{s^4 + 1.147 \cdot s^3 + 1.776 \cdot s^2 + 0.6162 \cdot s + 0.1224}$$

$$G(\text{olas} - \text{momentos}) = \frac{-0.097 \cdot s^3 + 0.09297 \cdot s^2 - 0.07033 \cdot s}{s^4 + 2.881 \cdot s^3 + 5.251 \cdot s^2 + 5.407 \cdot s + 2.057}$$

Modelo para la velocidad de 40 nudos:

$$G(\text{olas} - \text{fuerzas}) = \frac{0.06675 \cdot s^3 - 0.1022 \cdot s^2 + 0.9042 \cdot s - 0.189}{s^4 + 1.34 \cdot s^3 + 2.266 \cdot s^2 + 0.867 \cdot s + 0.189}$$

$$G(\text{olas} - \text{momentos}) = \frac{-0.0763 \cdot s^3 + 0.03032 \cdot s^2 - 0.9249 \cdot s}{s^4 + 3.029 \cdot s^3 + 6.194 \cdot s^2 + 6.854 \cdot s + 2.706}$$

Filtros Fuerzas-Arfada y Momentos-Cabeceo

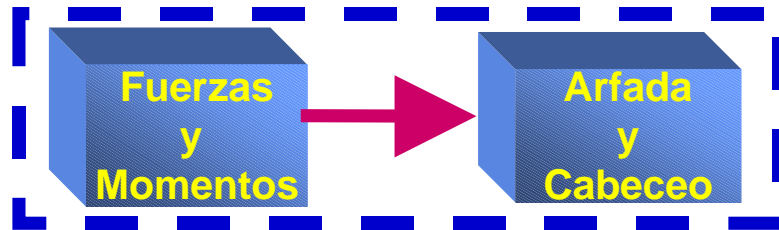


Figura 3: Modelo gráfico del filtro fuerzas y momentos a arfada y cabeceo

Modelo para la velocidad de 20

$$G(\text{fuerzas} - \text{arfada}) = \frac{0.43982 \cdot s^2 - 0.78376 \cdot s + 3.1086}{s^2 + 0.51297 \cdot s + 3.1086}$$

$$G(\text{momentos} - \text{cabeceo}) = \frac{-3.3962 \cdot s^3 + 19.365 \cdot s + 0.31343}{s^3 + 1.5576 \cdot s^2 + 2.7942 \cdot s + 1.0958}$$

Modelo para la velocidad de 30

$$G(\text{fuerzas} - \text{arfada}) = \frac{0.34185 \cdot s^2 - 0.49643 \cdot s + 2.8415}{s^2 + 0.45629 \cdot s + 2.8415}$$

$$G(\text{momentos} - \text{cabeceo}) = \frac{-2.6539 \cdot s^3 + 17.652 \cdot s + 0.45747}{s^3 + 1.2972 \cdot s^2 + 2.9644 \cdot s + 1.1184}$$

Modelo para la velocidad de 40

$$G(\text{fuerzas} - \text{arfada}) = \frac{0.26671 \cdot s^2 - 0.50981 \cdot s + 3.0532}{s^2 + 0.46921 \cdot s + 3.0532}$$

$$G(\text{momentos} - \text{cabeceo}) = \frac{-2.1041 \cdot s^3 + 16.44 \cdot s + 0.6906}{s^3 + 1.203 \cdot s^2 + 3.1552 \cdot s + 1.334}$$

Filtros olas - Arfada y Cabeceo

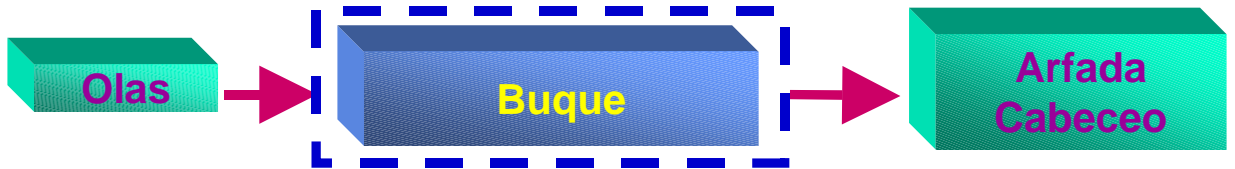


Figura 4: Modelo gráfico del filtro olas a arfada y cabeceo

20 nudos

$$G(\text{olas} - \text{arfada}) = \frac{0.03956 \cdot s^5 - 0.08339 \cdot s^4 + 0.4709 \cdot s^3 - 0.4233 \cdot s^2 + 1.247 \cdot s - 0.2268}{s^6 + 1.395 \cdot s^5 + 4.837 \cdot s^4 + 3.749 \cdot s^3 + 4.222 \cdot s^2 + 1.136 \cdot s + 0.2268}$$

30 nudos

$$G(\text{olas} - \text{arfada}) = \frac{0.03934 \cdot s^5 - 0.06813 \cdot s^4 + 0.6212 \cdot s^3 - 0.5143 \cdot s^2 + 2.343 \cdot s - 0.3287}{s^6 + 1.91 \cdot s^5 + 5.492 \cdot s^4 + 5.88 \cdot s^3 + 6.123 \cdot s^2 + 2.536 \cdot s + 0.3288}$$

40 nudos

$$G(\text{olas} - \text{arfada}) = \frac{0.0178 \cdot s^5 - 0.006781 \cdot s^4 + 0.3929 \cdot s^3 - 0.1994 \cdot s^2 + 2.857 \cdot s - 0.5769}{s^6 + 1.81 \cdot s^5 + 5.948 \cdot s^4 + 6.023 \cdot s^3 + 7.513 \cdot s^2 + 2.736 \cdot s + 0.5769}$$

20 nudos

$$G(\text{olas} - \text{cabeceo}) = \frac{0.3225 \cdot s^5 - 2.165 \cdot s^4 + 3.137 \cdot s^3 - 8.239 \cdot s^2 - 0.132 \cdot s}{s^7 + 4.098 \cdot s^6 + 10.61 \cdot s^5 + 17.73 \cdot s^4 + 20.3 \cdot s^3 + 16.02 \cdot s^2 + 7.339 \cdot s + 1.364}$$

30 nudos

$$G(\text{olas} - \text{cabeceo}) = \frac{0.2587 \cdot s^5 - 1.967 \cdot s^4 + 3.463 \cdot s^3 - 12.37 \cdot s^2 - 0.3217 \cdot s}{s^7 + 4.178 \cdot s^6 + 11.65 \cdot s^5 + 21.88 \cdot s^4 + 27.86 \cdot s^3 + 24.57 \cdot s^2 + 12.15 \cdot s + 2.301}$$

40 nudos

$$G(\text{olas} - \text{cabeceo}) = \frac{0.1605 \cdot s^5 - 1.318 \cdot s^4 + 2.392 \cdot s^3 - 15.18 \cdot s^2 - 0.6387 \cdot s}{s^7 + 4.232 \cdot s^6 + 12.99 \cdot s^5 + 25.2 \cdot s^4 + 34.53 \cdot s^3 + 33.14 \cdot s^2 + 17.68 \cdot s + 3.609}$$

2 DISEÑO DEL CONTROL

Objetivos del Control

1.- Mover los actuadores para atenuar lo más posible la aceleración vertical

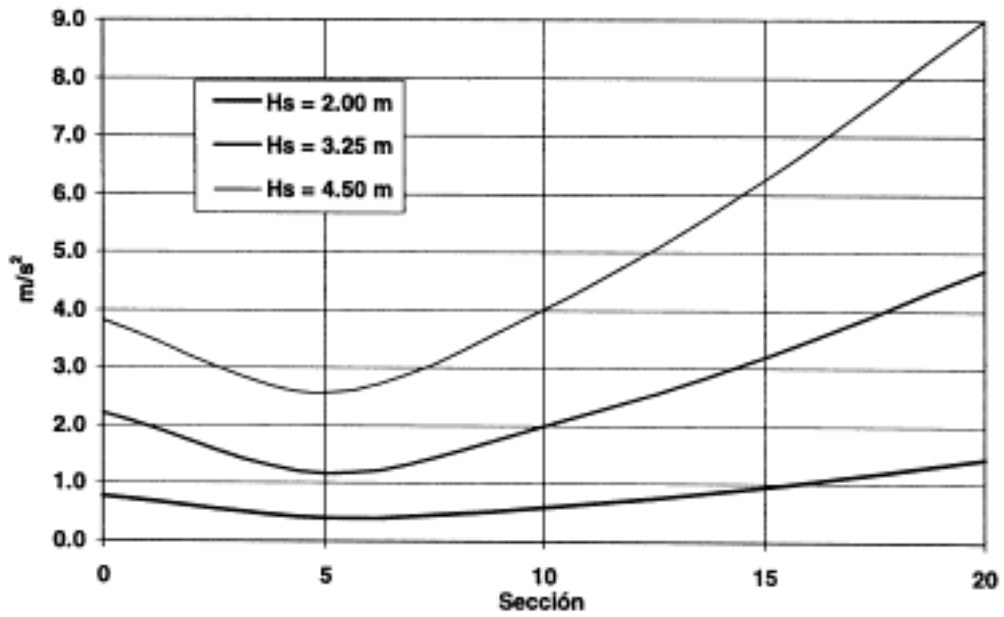


Figura 5: Amp.significativas de las aceleraciones verticales

2.- Criterio de control: Minimizar el índice de mareo (MSI)

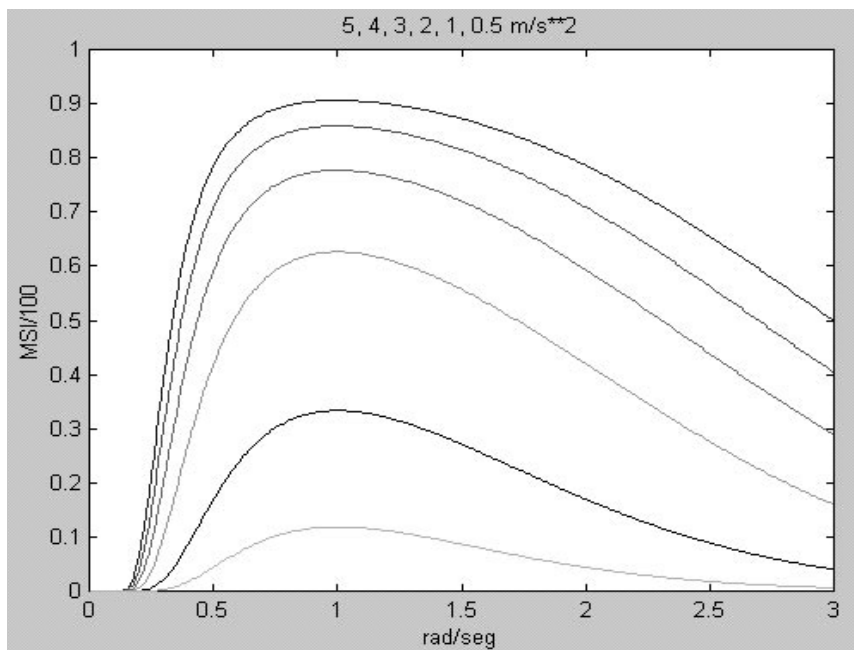


Figura 6: Variación del MSI con la aceleración y la frecuencia de encuentro

3 ACTUADORES

Son superficies móviles (sistema hidráulico)
 Su estudio ha requerido una labor de diseño
 Los alerones (Flaps) se han modelado basandose en los del barco
 El T-Foil se ha diseñado buscando una capacidad de actuación.

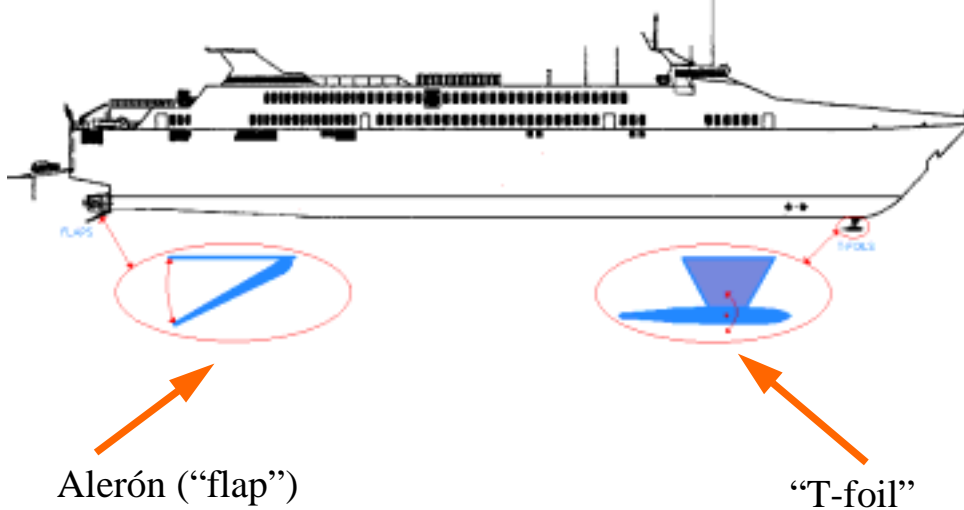


Figura 7: Esquema de la situación de los actuadores en el buque

Anchura	3.	M
Cuerda media	2.25	M
Razón de aspecto	1.33	
Área	6.75	m ²
Situación por debajo de quilla	1.5	M
Ángulo máx.	±15	°
Velocidad de rotación máxima	±13.5	°/s
Distancia a la primera perpendicular (proa)	10	m

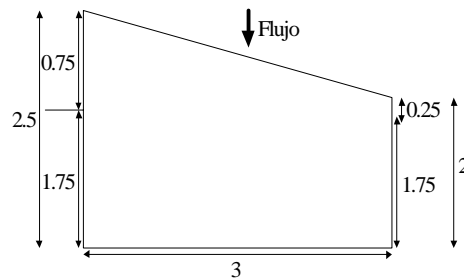
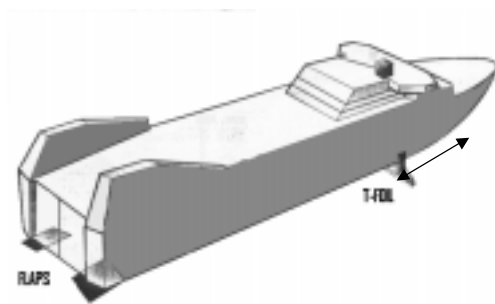
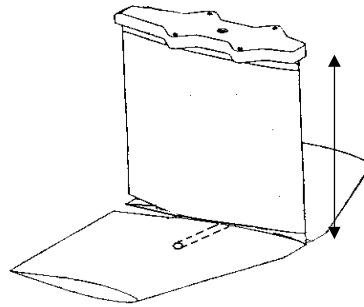


Figura 8: Descriptiva del T-Foil

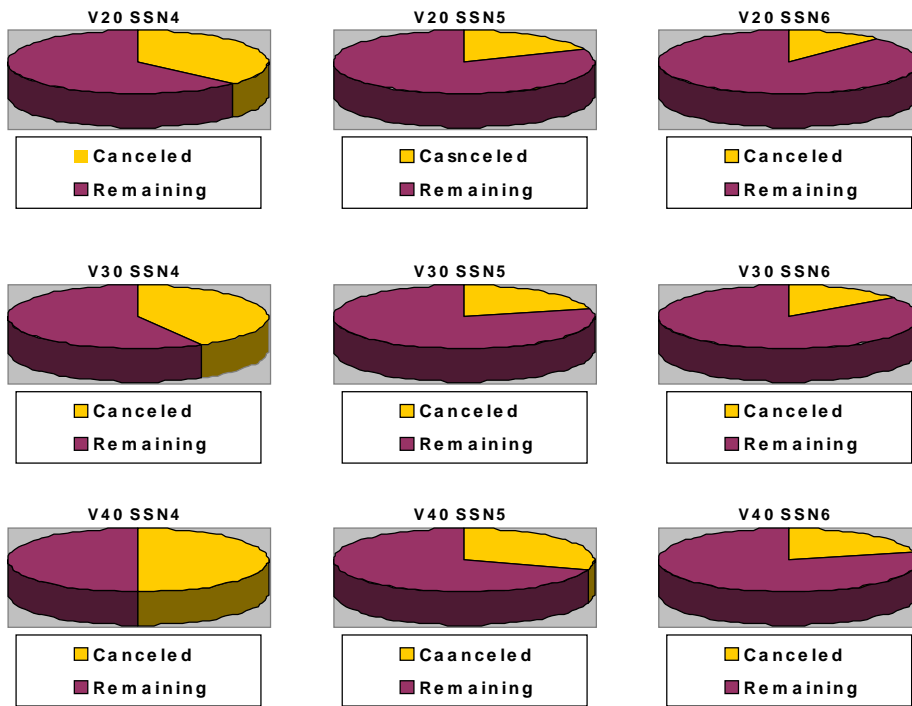


Figura 9: Previsión teórica ideal de reducción de la aceleración de arfada

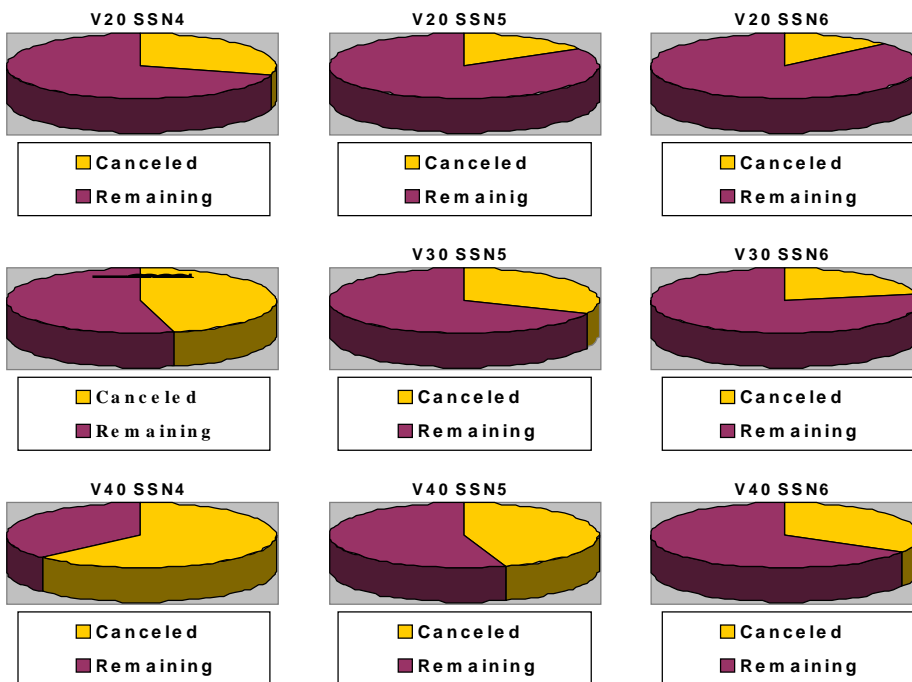
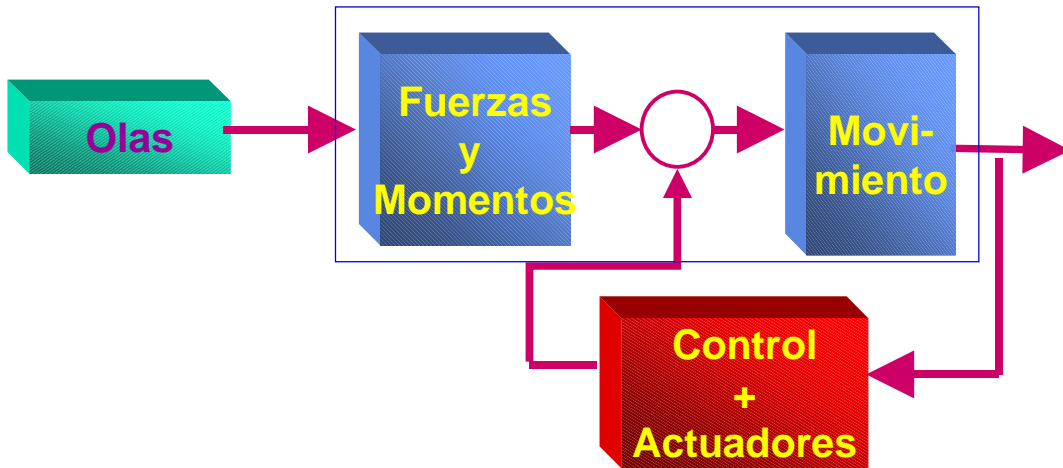


Figura 10 Previsión teórica ideal de reducción de la aceleración de cabeceo

4 EXPLICACIÓN DEL CONTROL



El tipo de control que se propone puede ser:

- ◆ Control Clásico (PD, PID, Red de 1º Orden, Red de 2º Orden)
- ◆ Control Predictivo
- ◆ Control QFT
- ◆ Control Fuzzy
- ◆ Control Optimo Multiobjetivo y Multicriterio
- ◆ Control LQG/LTR

El esquema general del control empleado, representado por el bloque en rojo en la figura anterior se muestra en la figura siguiente:

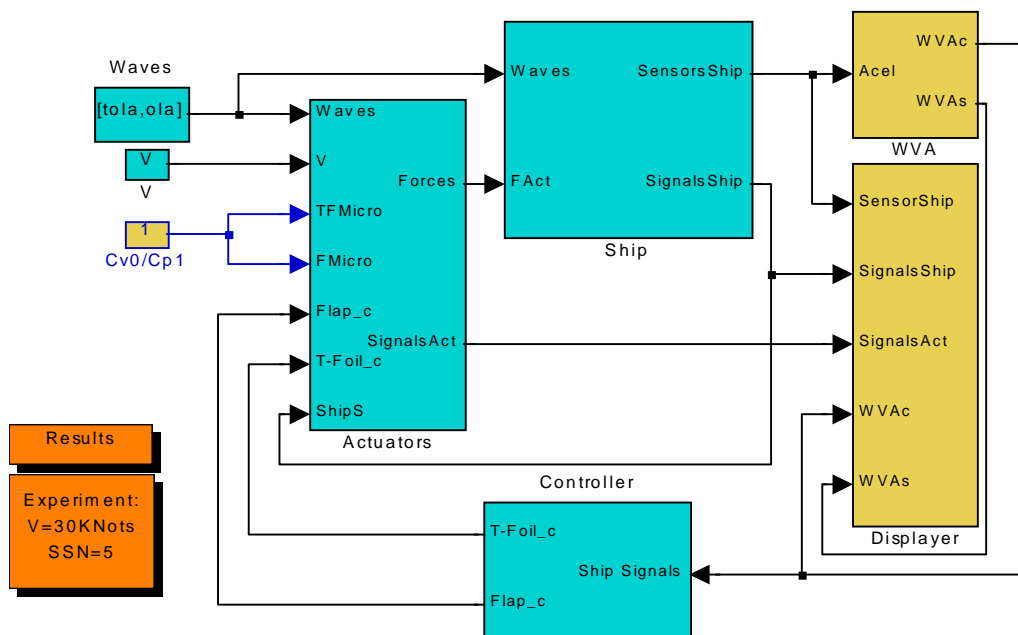


Figura 11: Esquema general del control

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Se compone principalmente de cuatro bloques fundamentales: El bloque ‘Ship’ que contiene los modelos del barco, el bloque ‘Actuators’ que contiene todo el modelado de los actuadores, el bloque ‘Controller’ que contiene el controlador que vayamos a utilizar y el bloque ‘F.Coste’ que se encarga de generar la aceleración del pasajero peor situado.

1. El Barco: donde se colocan los distintos modelos obtenidos para las diferentes velocidades del barco (REFERENCIA)

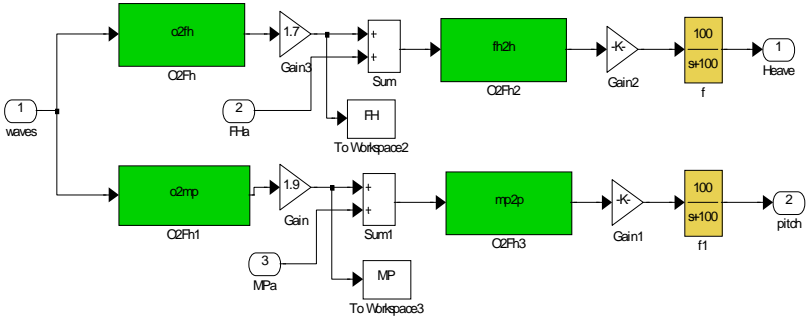


Figura 12: Modelo del barco utilizado

2. Los actuadores: Los resultados presentados en este informe son todas con los modelos no lineales de los actuadores, cuyo diagrama de bloques se presenta a continuación.

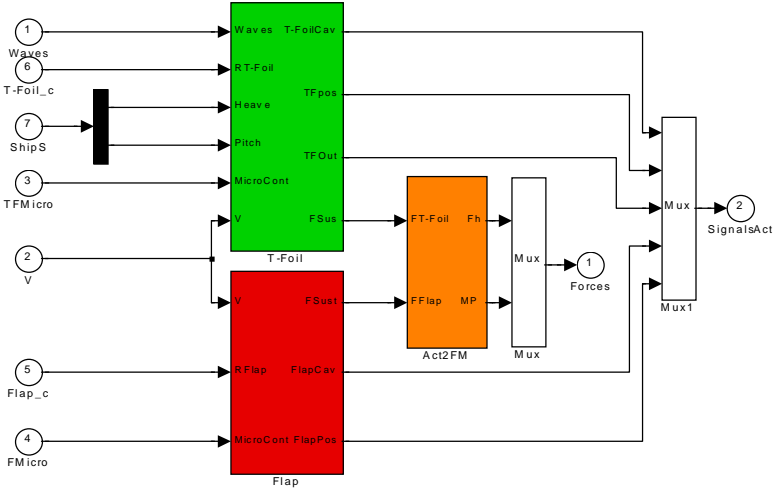


Figura 13: Modelo de los actuadores con sus entradas y salidas

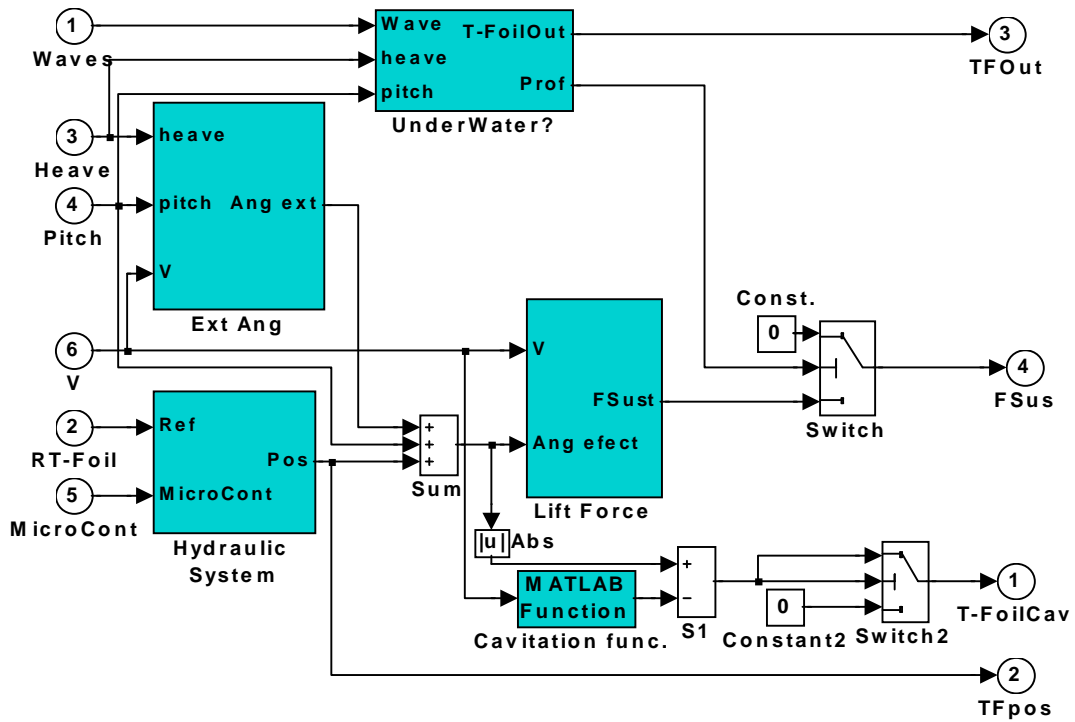


Figura 14 Modelo del T-Foil

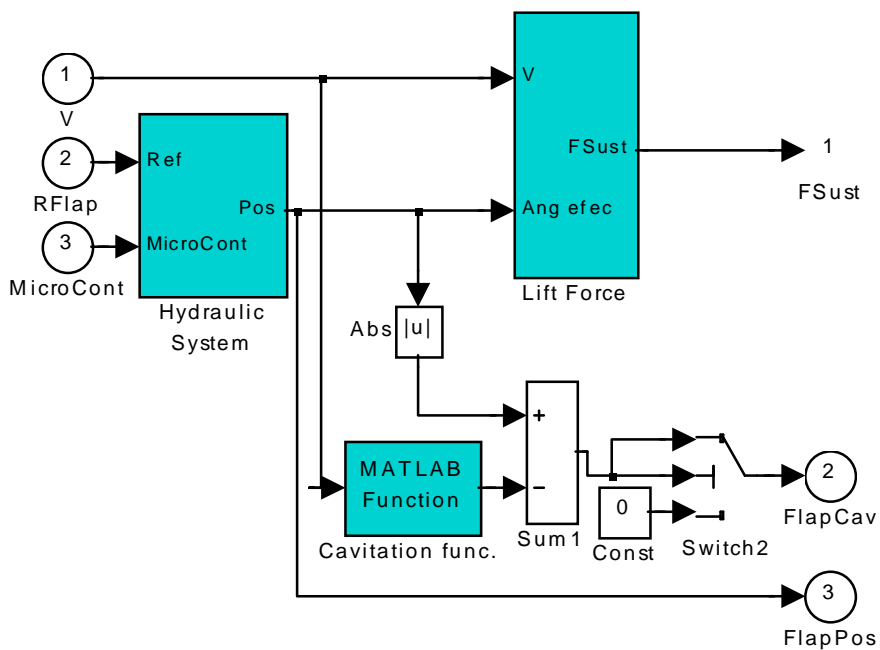


Figura 15 Modelo del Flap

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

3. El controlador: En este bloque se colocan los distintos modelos de controladores que se han utilizado y que han sido:
- ◆ Un PD o un PID

Están definidos por sus parámetros en ganancia K_{pt} y K_{pf}
 integración K_{it} , K_{if}
 derivación K_{dt} , K_{df}

La única diferencia está que en el caso del PD las constantes de integración se hacen nulas (K_{it} , K_{if})

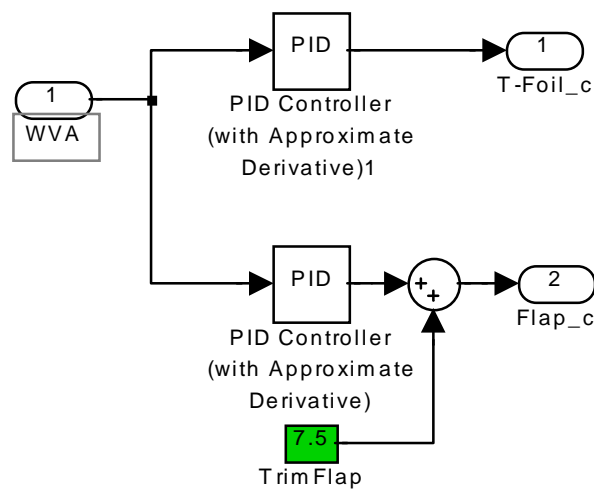


Figura 16: Esquema del PID utilizado.

- ◆ Una RED de primer orden

Se definen las ganancias los ceros y los polos de la red

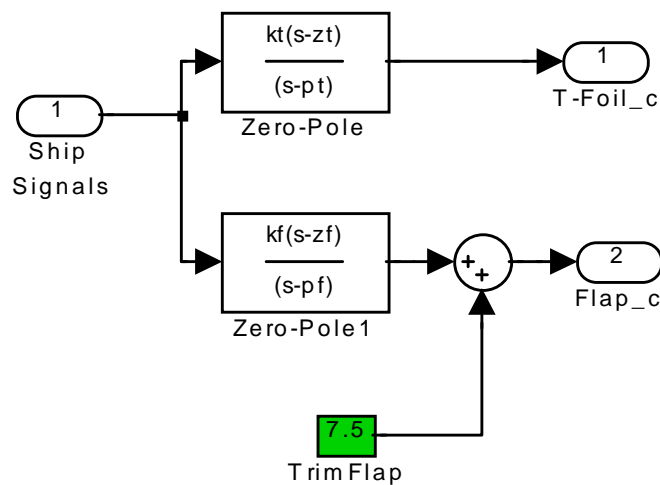


Figura 17: Esquema de una RED de primer orden

- ◆ Un RED de segundo orden

Se definen los parámetros de la red como se indican en la figura

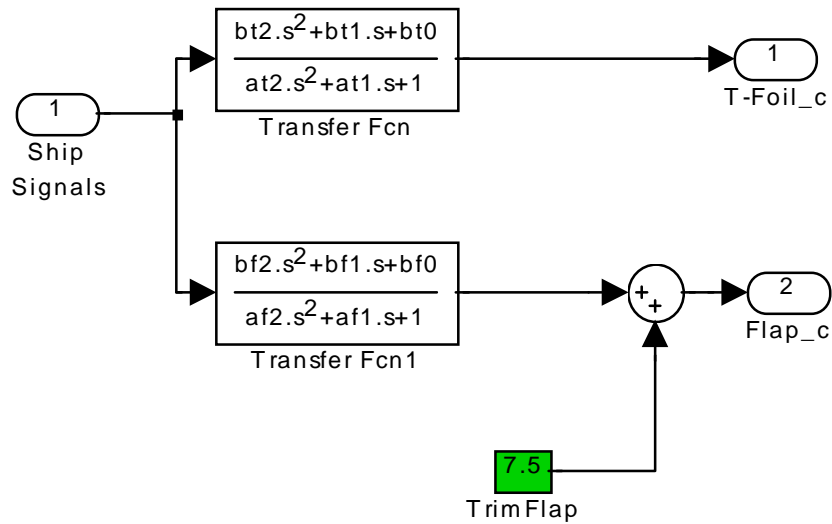


Figura 18: Esquema de una RED de segundo orden

El numerador se ha dejado libre, pero el denominador, para evitar polos inestables se ha exigido que todos los coeficientes sean positivos.

5 LA FUNCIÓN DE COSTE

En bloque ‘F.Coste’ que hemos utilizado como coste para la sintonización y como señal de error para el controlador tiene la siguiente estructura.

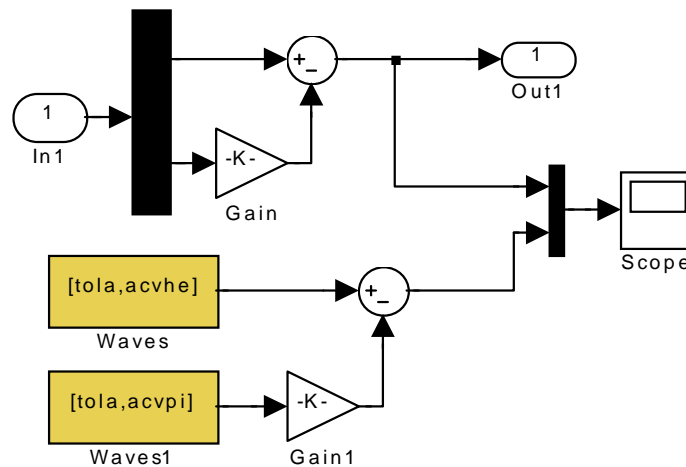


Figura 19: Diagrama de bloques para el cálculo de la función de coste

Por In1 llegan las dos aceleraciones del barco, aceleración heave del C.G. y aceleración pitch. La aceleración del peor pasajero, unos 40m por delante del C.G. será la

suma de los dos efectos en esa zona del barco. Con la ganancia Gain se pasa de aceleración angular a aceleración tangencial en el punto deseado. Se han guardado en los ficheros de datos las aceleraciones medidas sin controlador para poder compararla a las que se obtengan con los controladores. El 'Scope' dibuja ambas en una sola gráfica.

La función de coste es:

$$J_{\text{coste}} = \sum \frac{| \text{aceleración vertical del peor pasajero} |}{n^{\circ} \text{ de medidas}}$$

6 ESTUDIO DE LOS RANGOS DE LOS PARÁMETROS

Para poder lanzar optimizaciones, primero se han realizado pruebas sistemáticas para deducir sobre que zonas había que realizar las búsquedas. Se programaron bucles que recorrían cada una de las dimensiones del controlador, dándonos como resultados unas redes de puntos, que posteriormente se representaban gráficamente. Los estudios sistemáticos se realizaron por separado para el Flap y el T-foil, por la imposibilidad de representar gráficamente más de 4 dimensiones. Estas gráficas nos informan de que controladores y que valores aproximados son buenos, y si existen mínimos locales en la función de coste. Los resultados son muy satisfactorios, y se representan a continuación.

6.1 ESTUDIO DEL RANGO PARA UN CONTROLADOR PID

Se ha escogido como controlador un PID para el FLAP y otro PID para el T-FOIL. El rango de los parámetros han sido

acción proporcional	$-60 < K_{pt}, K_{pf} < +60$
acción integral	$-15 < K_{it}, K_{if} < +15$
acción derivativa	$-15 < K_{pd}, K_{pd} < +15$

Los resultados se han representado en cuatro dimensiones: tres para los valores de las constantes y la cuarta con un color (tonos rojos: valores malos; tonos azules: valores buenos)

6.1.1 PARA EL CONTROLADOR DEL FLAP

Para el caso del PID, se ha montado una red tetra-dimensional para poder mostrar los resultados. Las tres coordenadas espaciales determinan el valor de las constantes del PID. La cuarta coordenada es el color y representa la función de coste obtenida, colores fríos significa valores bajos, y colores cálidos significa valores altos. Se ha dibujado el punto óptimo, donde la gráfica es más oscura, valores más bajos posibles de la función de coste que significa una aceleración promedia más baja ($K_p=10, K_d=-5, K_i=12$).

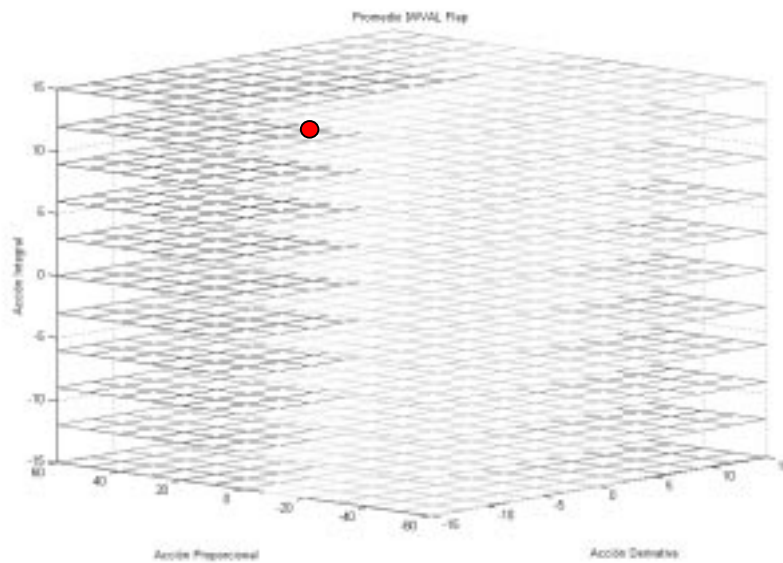


Figura 20: Malla de optimización de rangos de parámetros para el FLAP

Se dudó inicialmente de la importancia de la acción integral en este control; en cambio observando estos resultados parece bastante importante. Para ver realmente su importancia estudiemos como evoluciona el valor de la función de coste (promedio de los valores absolutos de la aceleración vertical) manteniendo la acción derivativa constante.

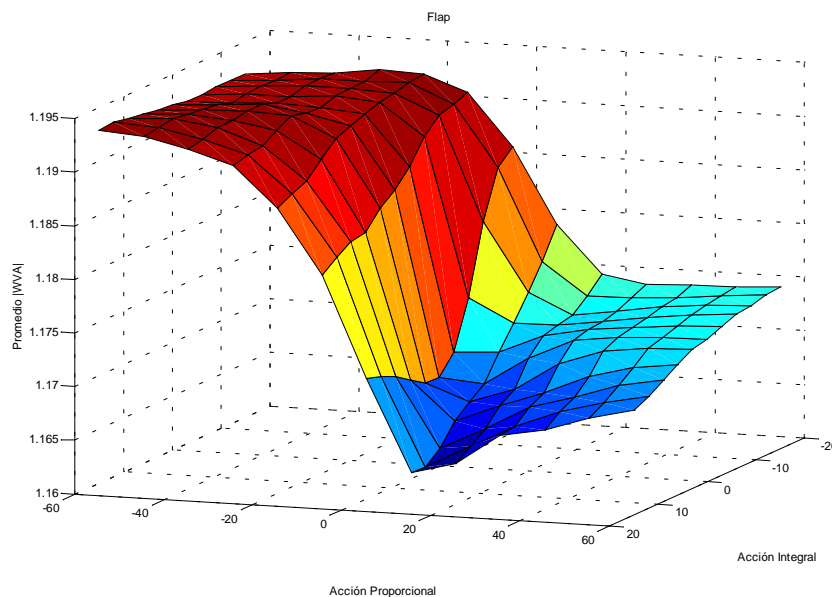


Figura 21: Función de coste dependiendo de los valores de K_{pf} y K_{if}

Como se puede observar en la gráfica anterior, la acción integral solo nos modifica el tercer decimal de la función de coste. Como esta acción puede dar problemas de 'Win-up' debido a las altas saturaciones a las que están sujetos los actuadores, se prescindirá de ella. Se ha realizado una representación más fina para las otras dos dimensiones, el caso del PD, manteniendo la acción integral constante.

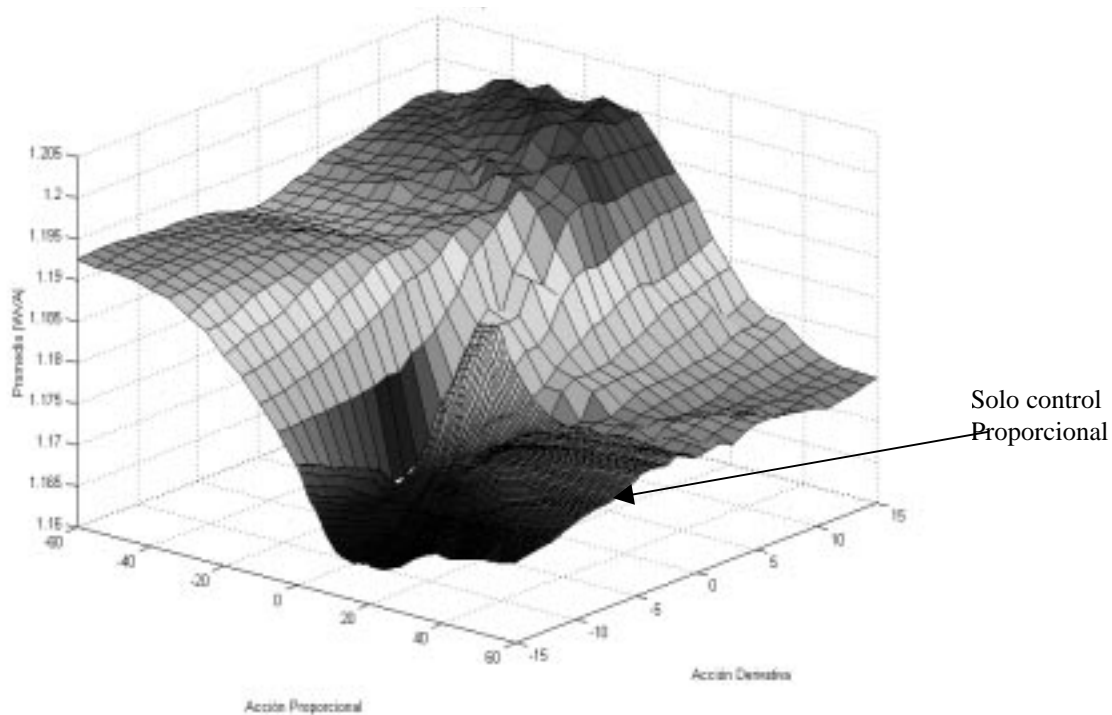


Figura 22: Función de coste dependiendo de los valores de K_{pf} y K_{df}

En la gráfica anterior, se puede ver que la acción predominante es la proporcional. El cuadrante de $K_{pf} > 0$ y $K_{df} < 0$ (representado con más precisión) es el que da buenos resultados, siendo en este cuadrante bastante importante la acción diferencial. Se puede apreciar un valle en el cual la función de coste toma los valores más bajos.

Por tanto aquí un control proporcional, es la cuerda marcada por la flecha, y dará peor resultado que un PD.

6.1.2 PARA EL CONTROLADOR DEL T-FOIL

Para el caso del T-foil se ha realizado el mismo estudio que para el Flap, se ha montado una red tetra-dimensional para poder mostrar los resultados del PID. Las tres coordenadas espaciales determinan el valor de las constantes del PID. La cuarta coordenada es el color y representa la función de coste obtenida, colores fríos significa valores bajos, y colores cálidos significa valores altos. Se ha dibujado el punto óptimo, donde la gráfica es más oscura, valores más bajos posibles de la función de coste que significa una aceleración promedia más baja ($K_p=60, K_d=-9, K_i=-3$). Al igual que en el caso del Flap también se han estudiado las acciones de dos en dos, para deducir la importancia de cada una, llegando a la conclusión de que la acción integral no es necesaria, y la diferencial casi tampoco. La acción importante para este actuador es la acción proporcional. En las gráficas siguientes se representan los mismos estudios que para el Flap.

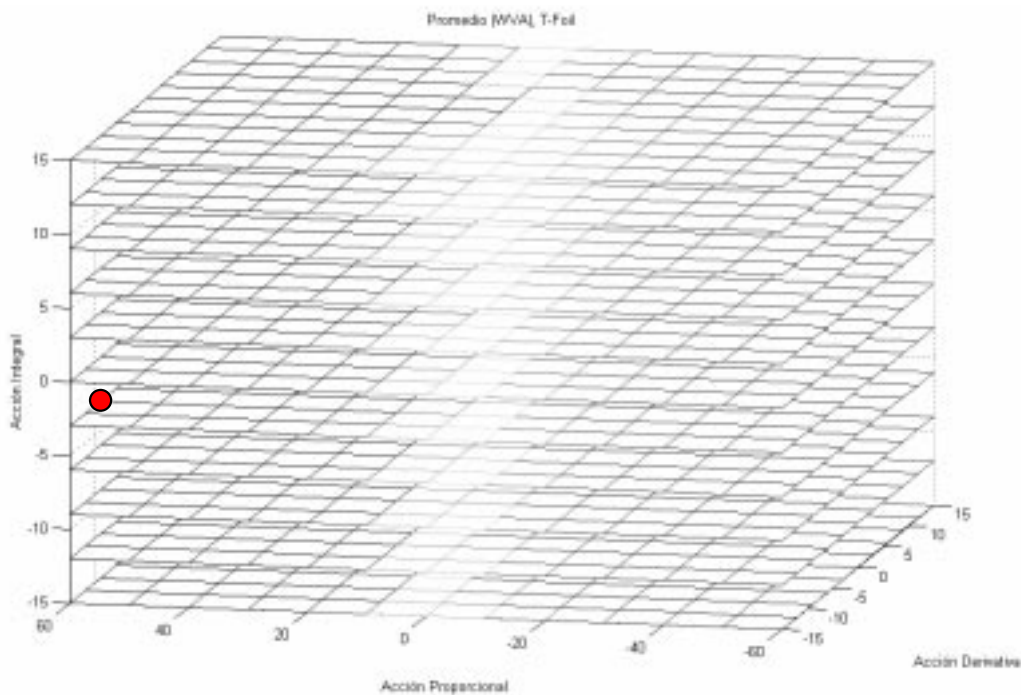
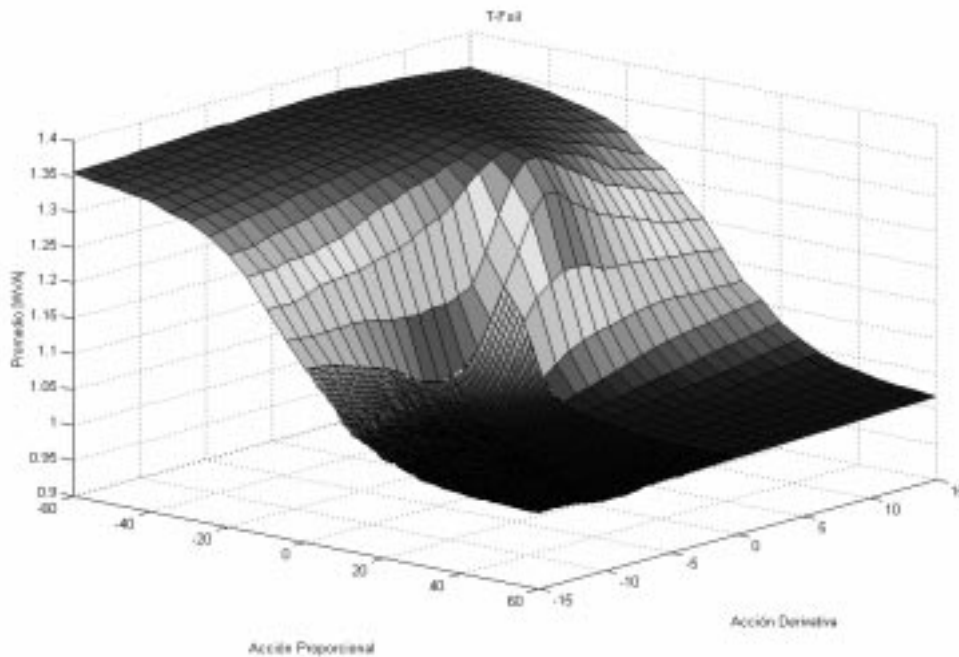
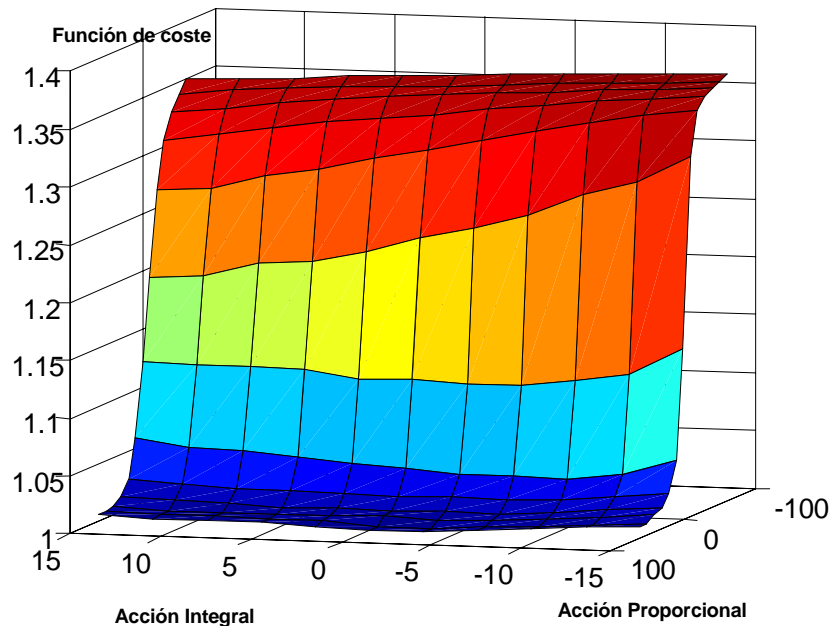


Figura 23: Malla de optimización de rangos de parámetros para el T-FOIL

El punto rojo da el conjunto de parámetros para el controlador óptimo del FLAP.



Sólo control proporcional

Figura 25: Función de coste dependiendo de los valores de K_{pt} y K_{dt}

En la gráfica se pueden observar dos cuadrantes que reducen las aceleraciones. En el de $K_{pt}>0$ y $K_{dt}<0$ se encuentra el óptimo en un suave valle que aparece gracias a la acción diferencial. Hay que tener en cuenta que la escala de esta gráfica es diferente a la del Flap, y por ello el valle queda más suavizado. Para observar el comportamiento de un control proporcional solamente hay que seguir en la gráfica la cuerda que equivale a $K_d=0$, apuntada por la flecha. Para el T-Foil si solo dejamos la acción proporcional solamente perdemos aproximadamente un uno por ciento respecto al PD.

6.2 ESTUDIO DE LOS RANGOS DE LOS PARÁMETROS EN UN PD

Nos centramos en el caso del PD y en un rango más restringido con el fin de afinar más.

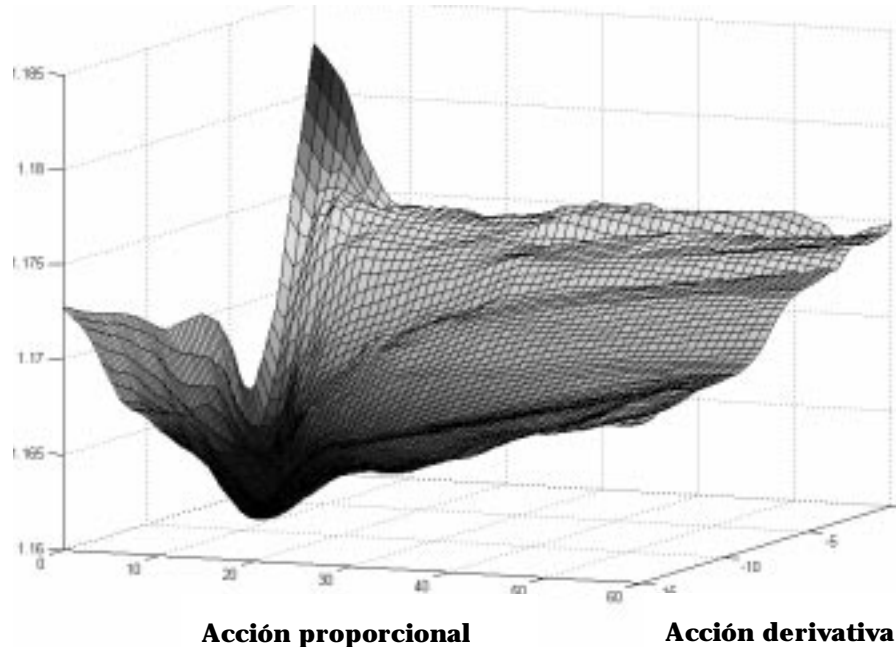


Figura 26: Función de coste dependiendo de los valores de K_{pf} y K_{df} del FLAP

Es de suponer, y se ha corroborado con las simulaciones, que colocando el Flap en posición intermedia (7.5°) de *trimado* conseguiremos mejores resultados, pues de esta forma tendremos acción de control positiva y negativa, mientras que si no le damos este ángulo solo podremos anular aceleraciones en un sentido. Las simulaciones que presenta la gráfica anterior es para el Flap con el citado ángulo de trimado. La misma gráfica, pero en el caso del T-Foil se presenta a continuación. Aunque el valle que ocasiona la acción diferencial es pequeño, respecto a la escala vertical supone un uno por ciento más de reducción.



Figura 27: Función de coste dependiendo de los valores de K_{pt} y K_{dt} del TFOIL

7 RESULTADOS GENERALES

7.1 VALOR DE LA FUNCIÓN DE COSTE CON LOS PARÁMETROS OBTENIDOS PARA DISTINTOS TIPOD DE CONTROLADORES

Control PD en posición

Velocidad y Estado de la mar	T-FOIL		FLAP		Función de coste sin control	Función de coste con controlador	Porcentaje de mejora
	Kpt	Kdt	Kdf	Kdf			
2e4	75.5545	-23.3784	7.6717	-11.2412	0.4505	0.4072	9.61
2e5	74.1126	-15.4210	21.0132	-13.1822	0.7918	0.7449	5.92
2e6	0.6015	-18.0451	0.1453	-15.6587	1.3572	1.3460	0.83 ¹
3e4	69.9208	-6.0106	29.8808	-14.2482	0.2837	0.1811	36.17
3e5	69.5948	-10.5442	16.3472	-9.5851	1.3033	1.1199	14.07
3e6	29.9627	-22.5811	34.1424	-1.8337	1.5143	1.4100	6.89
4e4	69.0613	-3.9795	18.3158	-3.3210	0.6960	0.4446	36.12
4e5	69.3832	-1.7519	27.9768	-16.5261	1.7518	1.4711	16.02
4e6	74.9838	-0.1132	38.8082	-20.5653	1.8654	1.6885	9.48

Tabla 1: Función de coste para un controlador PD (en posición)

Control PD en velocidad

Velocidad y Estado de la mar	T-FOIL		FLAP		Función de coste sin control	Función de coste con controlador	Porcentaje de mejora
	Kpt	Kdt	Kdf	Kdf			
2e4	48.6512	-12.3225	34.7938	-16.9383	0.4505	0.4010	10.99
2e5	79.5369	-5.2962	23.0307	-7.3492	0.7918	0.7441	6.02
2e6	5.5991	-19.9802	4.5439	-6.0271	1.3572	1.3492	0.58 ¹
3e4	69.2278	-0.2570	29.9061	-10.9851	0.2837	0.1991	29.84
3e5	69.9504	-6.9695	21.7409	-19.2086	1.3033	1.1191	14.13
3e6	24.9993	-16.2917	28.1939	-1.5281	1.5143	1.4108	6.83
4e4	69.6927	-0.6986	28.1525	-0.5709	0.6960	0.4323	37.89
4e5	17.5974	-0.2321	11.3630	-5.3621	1.7518	1.4562	16.87
4e6	79.9827	-0.0943	21.7985	-2.4341	1.8654	1.6814	9.86

Tabla 2: Función de coste para un controlador PD (en velocidad)

¹ Para esta configuración, debido a la baja velocidad los actuadores no tienen capacidad de dominar el barco frente al fuerte oleaje, por lo que la búsqueda del óptimo es infructuosa. Este fenómeno aparecerá en todas las tablas.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Se puede observar que en las dos configuraciones el estado más controlable es el 4e4, máxima capacidad de actuación frente a mínima perturbación. Se obtienen resultados mejores para la configuración en velocidad.

Control PID en posición

Velocidad y Estado del mar	T-FOIL			FLAP			Función de coste sin control	Función de coste controlado	Porcentaje de mejora
	Kpt	Kit	Kdt	Kdf	Kif	Kdf			
2e4	56.9512	10.6455	-18.1443	0.7901	11.7919	-7.6787	0.4505	0.4020	10.77
2e5	78.6048	11.7224	-11.3796	1.9490	11.6308	-5.0528	0.7918	0.7390	6.67
2e6	0.7157	9.7053	-21.6464	0.1309	5.7651	-6.3076	1.3572	1.3371	1.48
3e4	69.2874	8.9610	-1.8463	69.2318	8.8401	-5.1499	0.2837	0.1733	38.93
3e5	54.8670	7.9679	-6.2172	5.7080	9.9444	-4.3999	1.3033	1.1141	14.52
3e6	28.2205	2.0921	-17.8582	2.6282	11.6464	-0.7770	1.5143	1.3898	8.22
4e4	68.9793	9.7817	-3.3437	29.0163	9.7723	-0.6942	0.6960	0.4326	37.84
4e5	79.7747	0.0941	-0.3156	1.8889	11.6940	-2.4726	1.7518	1.4395	17.83
4e6	26.0444	8.9447	-0.1191	0.4141	5.1013	-10.7593	1.8654	1.6593	11.05

Tabla 3: Función de coste para un controlador PID (en posición)

Control PID en velocidad

Velocidad y Estado del mar	T-FOIL			FLAP			Función de coste sin control	Función de coste controlado	Porcentaje de mejora
	Kpt	Kit	Kdt	Kdf	Kif	Kdf			
2e4	55.8467	9.3889	-13.6668	39.0849	8.4356	-11.6022	0.4505	0.3985	11.53
2e5	69.0735	9.8881	-0.5395	16.9137	9.9287	-5.1815	0.7918	0.7414	6.373
2e6	3.4069	9.6672	-17.2560	9.3962	9.9892	-0.1172	1.3572	1.3404	1.24
3e4	68.8782	-5.2261	-0.2683	69.2888	9.5950	-8.1997	0.2837	0.1833	35.41
3e5	62.5340	6.1754	-1.6014	17.5929	9.9826	-9.9480	1.3033	1.1126	14.63
3e6	24.6908	6.7449	-11.2340	17.9767	9.4167	-6.3076	1.5143	1.3945	7.91
4e4	68.9227	0.5842	-0.0204	69.1111	9.7113	-6.0766	0.6960	0.4254	38.88
4e5	68.3123	-9.0941	-0.2630	11.1607	9.5520	-15.9522	1.7518	1.4492	17.27
4e6	65.3757	9.4960	-0.9597	17.2643	9.6532	-10.4018	1.8654	1.6733	10.29

Tabla 4: Función de coste para un controlador PID (en velocidad)

El PID da unos valores un poco mejores que el PD, lo que nos pone en un compromiso de utilizar o no utilizar la acción integral.

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Control con una RED 1° orden en posición

Velocidad y Estado del mar	T-FOIL			FLAP			Función de coste sin control	Función de coste controlado	Porcentaje de mejora
	Cero	Polo	K	Cero	Polo	K			
2e4	-1.7918	-0.0412	36.9145	-3.9977	-0.0229	39.9228	0.4505	0.3995	11.32
2e5	-2.7319	-0.1719	27.2197	-3.9394	-0.0136	17.0433	0.7918	0.7324	7.50
2e6	-0.0940	-2.5833	-0.0351	-3.1743	-0.0061	35.3489	1.3572	1.3521	0.28
3e4	-2.3608	-0.4218	25.6951	-2.6971	-0.1617	29.8732	0.2837	0.1705	39.89
3e5	-1.1689	-0.0138	26.8194	-2.9408	-0.0344	20.8605	1.3033	1.1090	14.91
3e6	-2.1587	-0.0132	14.7810	-3.2687	-0.3160	39.4544	1.5143	1.3854	8.51
4e4	-1.9362	-0.5358	27.8493	-2.5946	-0.2175	22.6207	0.6960	0.4278	38.53
4e5	-2.0950	-2.1189	29.2836	-2.9561	-0.1688	16.7010	1.7518	1.4498	17.23
4e6	-2.6470	-1.6299	37.3539	-1.8405	-0.0518	31.8831	1.8654	1.6716	10.39

Tabla 5: Función de coste para un controlador RED 1° Orden (en posición)

Control con una RED 1° orden en velocidad

Velocidad y Estado de la mar	T-FOIL			FLAP			Función de coste sin control	Función de coste controlado	Porcentaje de mejora
	Cero	Polo	K	Cero	Polo	K			
2e4	-2.9542	-0.7763	28.8877	-2.9197	-0.2131	26.9396	0.4505	0.3945	12.42
2e5	-0.8117	-0.0917	28.6288	-2.7139	-0.1128	27.7442	0.7918	0.7367	6.96
2e6	-2.9697	-0.0284	3.2843	-2.8683	-0.0273	5.4212	1.3572	1.3433	1.03
3e4	-1.4694	-0.9819	29.4798	-2.8666	-0.1982	28.0539	0.2837	0.2026	28.61
3e5	-2.8002	-2.0579	29.9344	-2.4927	-0.0344	23.7385	1.3033	1.1127	14.62
3e6	-2.1276	-0.1454	14.5362	-2.3277	-0.3089	16.5842	1.5143	1.3935	7.98
4e4	-2.7829	-1.8699	29.7986	-2.9224	-0.4712	21.8964	0.6960	0.4355	37.42
4e5	-2.0798	-2.4987	17.1138	-2.8704	-0.2139	26.8107	1.7518	1.4359	18.03
4e6	-1.9538	-2.7149	15.0255	-2.6676	-0.3079	29.2333	1.8654	1.6634	10.83

Tabla 6: Función de coste para un controlador RED 1° Orden (en velocidad)

La red de primer orden nos da unos resultados un poco mejores que el PID, esto nos induce a buscar una estructura más compleja de este tipo, una red de segundo orden

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Control con una RED 2° orden en posición

Velocidad y Estado de la mar	T-FOIL					FLAP					Valor de la función de coste
	bt2	bt1	bt0	at1	ato	bf2	bf1	bf0	af1	af0	
2e4	39.8145	100.1579	69.0434	1.3412	0.0412	38.2228	198.7222	161.0994	0.7229	0.0229	0.3982
2e5	29.9197	98.6812	75.8615	1.8719	0.0719	23.7021	84.4837	66.8404	1.1136	0.0136	0.7326
2e6	9.4980	-13.2398	-0.8033	11.3003	10.9805	37.4489	148.3569	111.2080	0.6160	0.0161	1.3453
3e4	32.7251	86.9561	62.5610	1.8218	0.0218	-2.9057	111.8442	80.1710	1.7617	0.0617	0.1652
3e5	29.1194	57.1686	17.5022	1.5138	0.0138	22.6605	83.6071	60.4466	1.1344	0.0344	1.1106
3e6	21.0752	44.8887	32.4077	1.0132	0.0132	22.8183	170.6190	127.3646	2.1160	0.3160	1.3832
4e4	30.7493	81.2711	53.7218	1.7358	0.7358	22.6207	24.1084	61.5917	0.7175	0.0175	0.4318
4e5	28.9836	19.6963	63.8491	2.0189	0.5189	18.4315	26.7325	49.8698	1.3688	0.0688	1.4023
4e6	5.3356	136.1297	97.2758	19.7695	0.1289	-28.2047	88.6639	28.8304	4.4528	0.0518	1.6652

Tabla 7: Valor de los parámetros del controlador RED 2° orden (en posición)

Control con una RED 2° orden en velocidad

Velocidad y Estado de la mar	T-FOIL					FLAP					Valor de la función de coste
	bt2	bt1	bt0	at1	ato	bf2	bf1	bf0	af1	af0	
2e4	57.6328	116.0277	85.0400	1.3763	0.5763	27.3396	105.4952	79.0556	0.8131	0.2131	0.3926
2e5	148.9148	55.7099	142.7151	0.5917	0.0917	28.8442	101.8392	82.6218	0.7128	0.1128	0.7260
2e6	0.0094	-0.0078	9.7534	0.0001	0.0000	0.0006	0.0023	0.0016	0.0001	0.0000	1.3261
3e4	29.9798	126.7724	133.3758	0.3819	5.7138	33.0945	126.6586	80.8193	1.3982	0.1982	1.1790
3e5	32.0344	125.4108	82.1223	2.9579	2.2579	23.3385	72.1134	60.6730	1.4344	0.0344	1.1157
3e6	17.0362	45.4634	30.2272	1.6454	0.1454	17.4842	57.0872	37.8030	1.1089	0.0089	1.3870
4e4	80.5383	143.3766	110.6092	2.5699	1.2699	23.1964	87.1864	62.8900	1.4712	0.5712	0.4211
4e5	86.3495	128.5637	147.9255	3.5987	2.4987	28.2107	100.8879	77.2574	2.0139	0.0139	1.4196
4e6	18.7235	43.4823	29.5568	4.5149	1.1149	28.7333	108.9161	76.7828	1.8079	0.3079	1.6558

Tabla 8: Función de coste para un controlador RED 2° Orden (en velocidad)

Hasta ahora los mejores resultados los ha dado la red de primer orden en la configuración de control en posición, por lo que se puede tomar este como referencia.

Veamos en una simulación que significa estos porcentajes de mejora en las aceleraciones del peor pasajero. La siguiente figura muestra la aceleración del peor pasajero para el caso de velocidad 30 nudos y estado de la mar 5. El control aplicado es el PD en posición. Se puede observar que las aceleraciones intermedias y bajas es capaz de reducirlas considerablemente, el problema son las aceleraciones picos, que son ocasionadas por olas grandes o ‘pantocazos’. Para poder reducir estas aceleraciones necesitaríamos más poder de actuación.

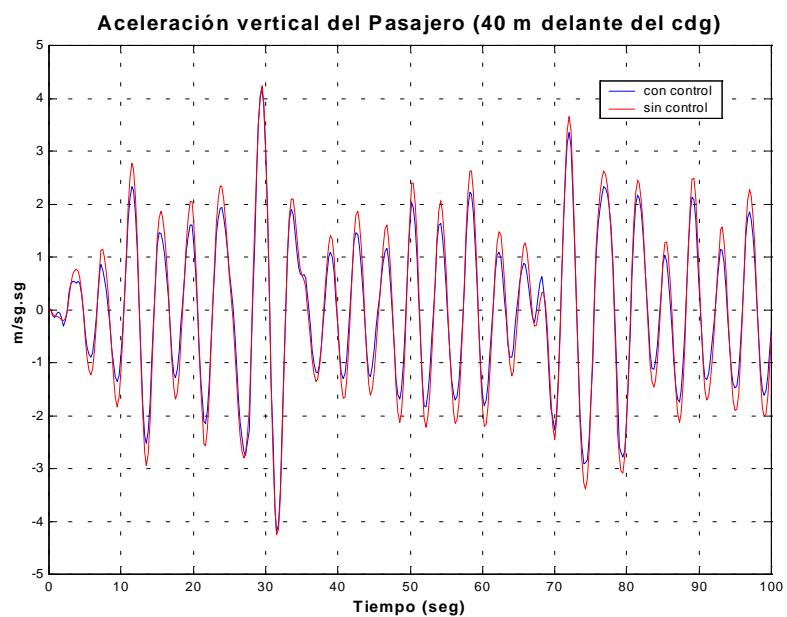


Figura 28: Simulación con y sin control.

8 INFLUENCIA DE LA POSICIÓN DEL T-FOIL Y FLAP

Se ha realizado un estudio con los actuadores en posiciones fijas. Es de suponer que los actuadores en posiciones fijas no produzcan aceleraciones modificaciones sobre las aceleraciones, ya a que al ser los modelos del barco lineales, a este le es indiferente ir un poco más o menos levantado o inclinado. Si los actuadores están fijos, el único efecto no lineal que aparece es debido al lazo de realimentación que hay a través de los actuadores, que contiene saturaciones y el efecto de pérdida, y estas probocarán una leve modificación. Como se puede observar en la gráfica, el porcentaje de mejora en el mejor caso es solo de un 0.3%, lo que si que consiguen es empeorarlo hasta un 1%.

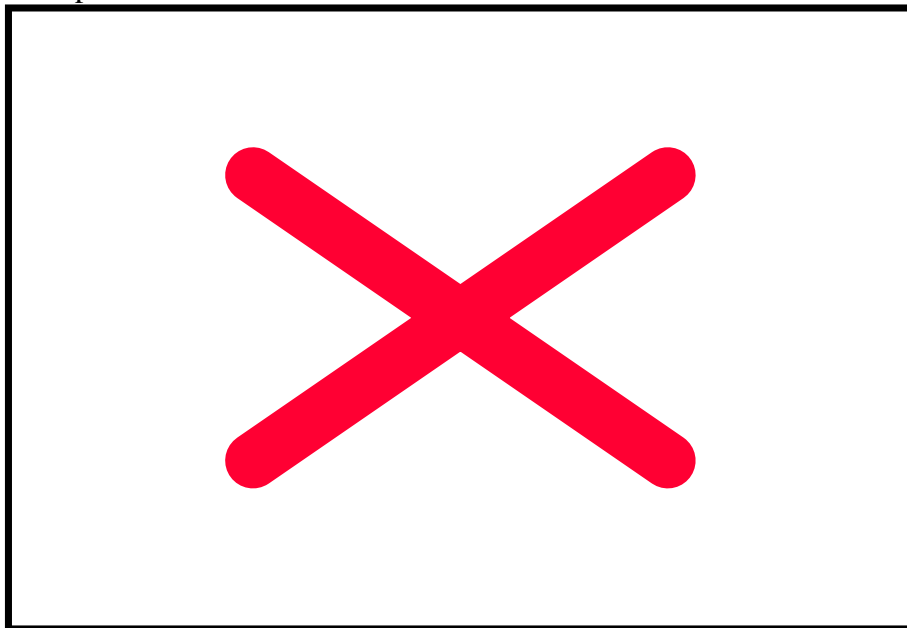


Figura 29: Porcentaje de mejora para Flap y T-foil fijos.

9 TABLA RESUMEN DE TODOS LOS EXPERIMENTOS

A continuación presentamos las tablas resumen de todos los experimentos realizados con todos los controladores utilizados.

En la primera columna está la función de coste sin controlador.

En las demás columnas, por pares, va la función de coste de cada controlador y su porcentaje de mejora.

Experimentos realizados con control en posición

Velocidad y Estado de la mar	Sin Control	PD J	PD %	PID J	PID %	Red 1º.Or J	Red 1º.Or %	Red 2º.Or J	Red 2º.Or %
2e4	0.4505	0.4072	9.61	0.4020	10.77	0.3995	11.32	0.3982	11.61
2e5	0.7918	0.7449	5.92	0.7390	6.67	0.7324	7.50	0.7326	7.92
2e6	1.3572	1.3460	0.83	1.3371	1.48	1.3521	0.28	1.3453	0.87
3e4	0.2837	0.1811	36.17	0.1733	38.93	0.1705	39.89	0.1652	41.77
3e5	1.3033	1.1199	14.07	1.1141	14.52	1.1090	14.91	1.1106	14.79
3e6	1.5143	1.4100	6.89	1.3898	8.22	1.3854	8.51	1.3832	8.66
4e4	0.6960	0.4446	36.12	0.4326	37.84	0.4278	38.53	0.4318	37.96
4e5	1.7518	1.4711	16.02	1.4395	17.83	1.4498	17.23	1.4023	19.96
4e6	1.8654	1.6885	9.48	1.6593	11.05	1.6716	10.39	1.6652	10.73

Experimentos realizados con control en velocidad

Velocidad y Estado de la mar	Sin Control	PD J	PD %	PID J	PID %	Red 1º.Or J	Red 1º.Or %	Red 2º.Or J	Red 2º.Or %
2e4	0.4505	0.4010	10.99	0.3985	11.53	0.3945	12.42	0.3926	12.8
2e5	0.7918	0.7441	6.02	0.7414	6.373	0.7367	6.96	0.7260	8.3
2e6	1.3572	1.3492	0.58	1.3404	1.24	1.3433	1.03	1.3261	2.3
3e4	0.2837	0.1991	29.84	0.1833	35.41	0.2026	28.61	0.1790	36.9
3e5	1.3033	1.1191	14.13	1.1126	14.63	1.1127	14.62	1.1157	14.39
3e6	1.5143	1.4108	6.83	1.3945	7.91	1.3935	7.98	1.3870	8.40
4e4	0.6960	0.4323	37.89	0.4254	38.88	0.4355	37.42	0.4211	39.49
4e5	1.7518	1.4562	16.87	1.4492	17.27	1.4359	18.03	1.4196	18.96
4e6	1.8654	1.6814	9.86	1.6733	10.29	1.6634	10.83	1.6558	11.24

9.1 TABLA RESUMEN CON EL MSI OBTENIDO Y PORCENTAJE DE MEJORA

Tomamos para valorar el índice de mareo los controladores obtenidos, para las distintas velocidades y estados de la mar, para una **red de segundo orden** que es la que en conjunto da los mejores resultados. En la siguiente tabla se presentan los índices MSI y WVA.

Velocidad y Estado de la mar	MSI Sin Control	MSI Con Control	Mejora %	WVA Sin Control	WVA Con Control	Mejora %
2e4	9.70	7.65	21.1%	0.45	0.39	11.3%
2e5	20.33	18.11	10.9%	0.79	0.74	7.2%
2e6	28.77	28.45	1.1%	1.36	1.35	0.9%
3e4	3.60	0.85	76.6%	0.28	0.17	42.0%
3e5	39.97	33.59	16.0%	1.30	1.11	14.5%
3e6	34.77	31.69	8.8%	1.51	1.42	7.5%
4e4	20.35	8.78	56.8%	0.70	0.43	38.3%
4e5	53.80	44.15	17.9%	1.75	1.40	20.0%
4e6	45.33	40.48	10.7%	1.87	1.67	10.8%

Tabla 9: Índices MSI y WVA con dos redes de segundo orden.

El siguiente histograma muestra los resultados obtenidos en la tabla anterior para el índice MSI

Porcentaje de mejora del MSI

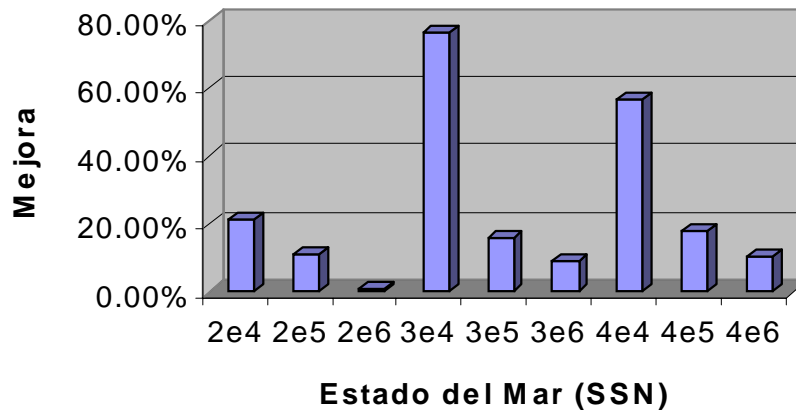


Tabla 10 Mejora porcentual del índice MSI

9.2 UN ÚNICO CONTROLADOR PARA TODO EL CONTROL

A continuación hemos probado un único controlador para todas las velocidades y estado de la mar. Se han medido los índices MSI y WVA . En la tabla siguiente se presentan los resultados para el controlador obtenido con una red de segundo orden para la velocidad de 30 nudos y estado de la mar 4, aplicado a todos los estados de la mar y velocidades.

Velocidad y Estado de la mar	MSI Sin Control	MSI Con Control	Mejora %	WVA Sin Control	WVA Con Control	Mejora %
2e4	9.70	7.84	19.2%	0.45	0.40	10.2%
2e5	20.33	18.15	10.7%	0.79	0.74	7.1%
2e6	28.77	28.87	0%	1.36	1.36	0%
3e4	3.60	0.85	76.6%	0.28	0.17	42.0%
3e5	39.97	33.88	16.5%	1.30	1.11	14.9%
3e6	34.77	31.76	8.6%	1.51	1.40	7.3%
4e4	20.35	8.88	56.3%	0.70	0.43	38.0%
4e5	53.80	45.65	15.2%	1.75	1.45	17.2%
4e6	45.33	40.6	10.4	1.87	1.67	10.5%

Tabla 11: Índices MSI y WVA aplicando el controlador 3e4 a todos los casos posibles

El controlador 3e4 aplicado en general

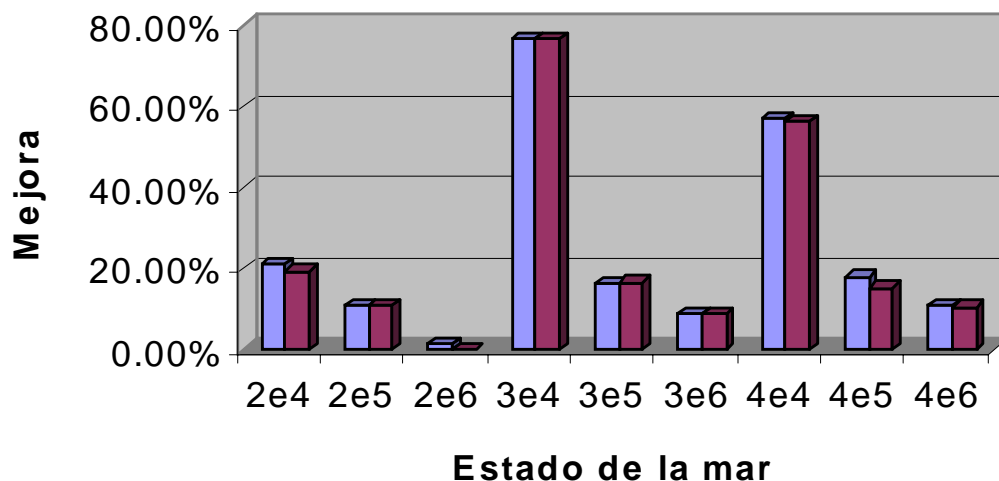


Tabla 12: Comparación de la mejora del MSI con el controlador 3e4 para todos

9.3 SISTEMA GRÁFICO PARA LA MEDIDA DEL MSI Y OBSERVACIÓN DEL CONTROL DEL BARCO

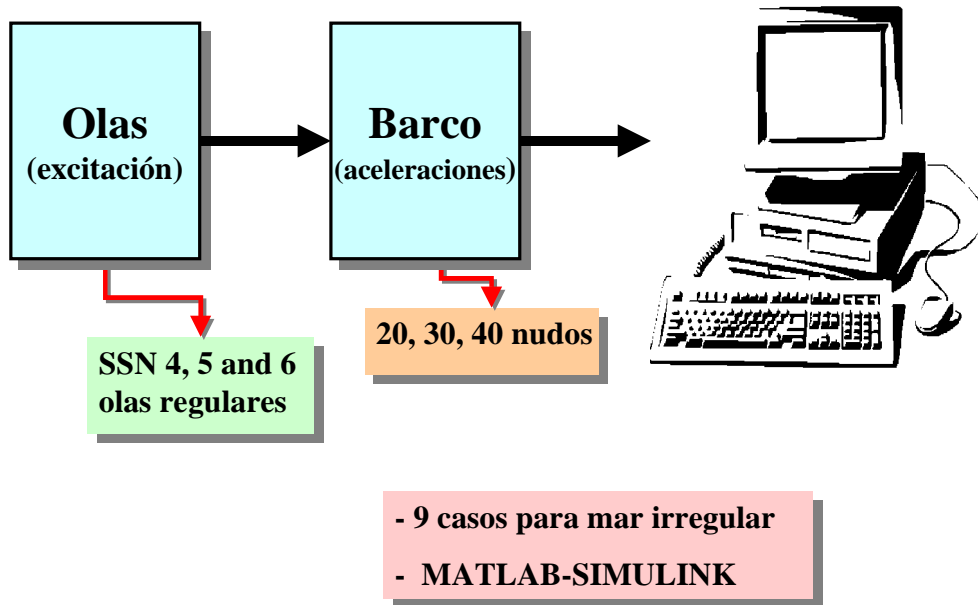


Figura 30 Esquema general de la simulación

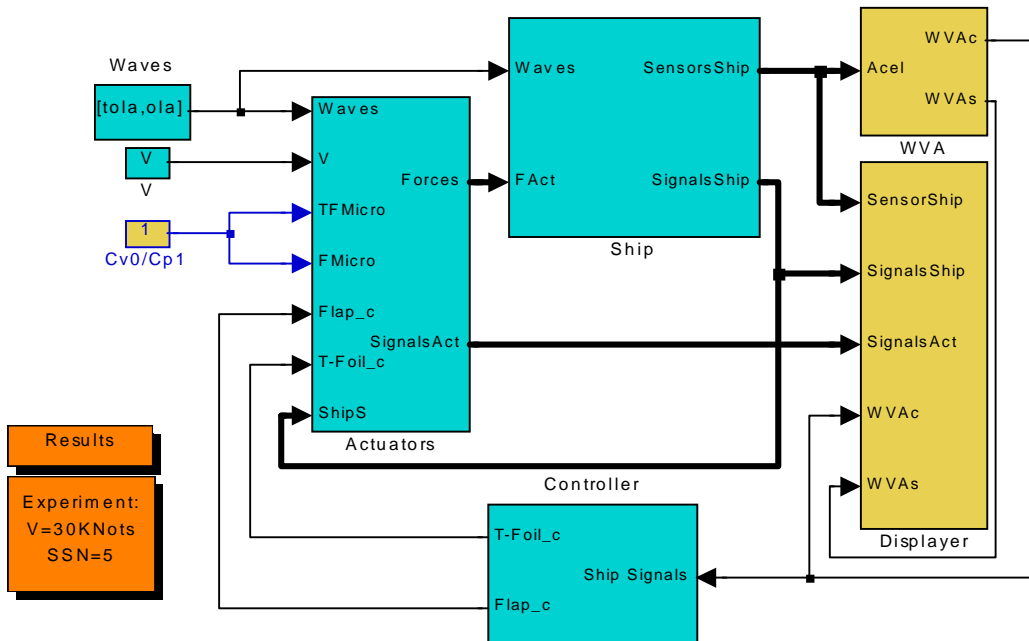


Figura 31: Esquema general de los dispositivos diseñados

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Se han añadido, al sistema general, dos botonos (en color naranja) que permiten diseñar las características de la simulación y obtener los resultados de la simulación sobre la pantalla de visualización de la simulación.

Si abrimos el boton de "Experiment", ver figura, se puede de modo muy sencillo poner las características del experimento: tiempo de la simulación, velocidad de las olas y estado de la mar.

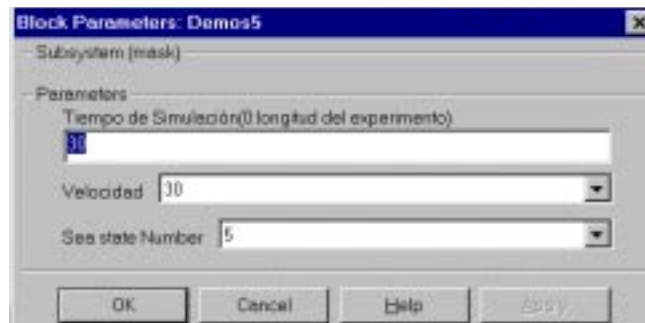


Figura 32: Elemento elaborador de experimentos en Simulink

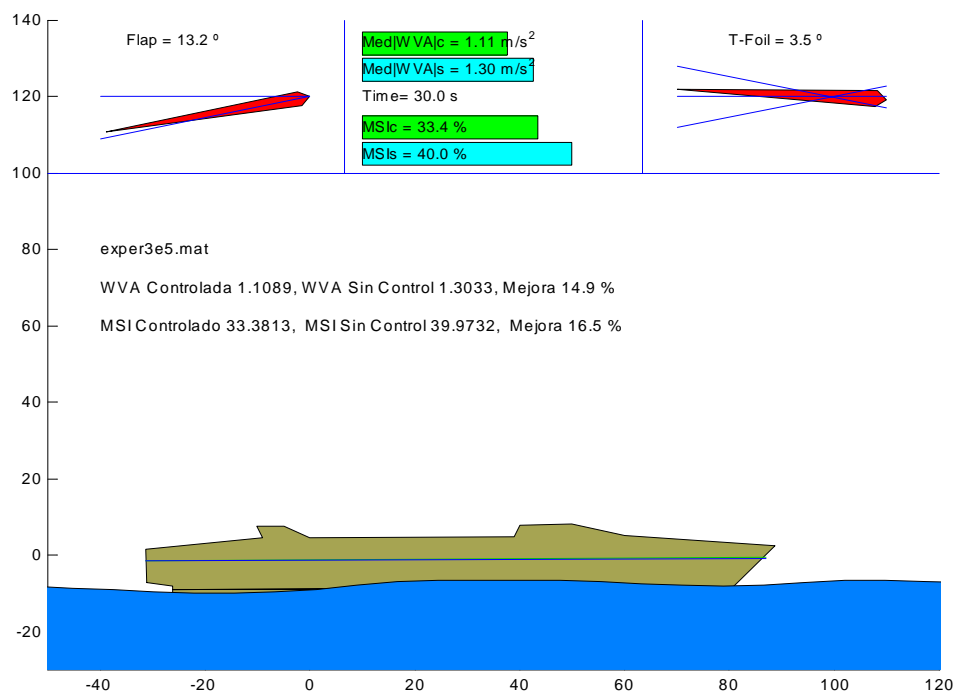


Figura 33: Pantalla para la visualización de la simulación

En esta pantalla se visualiza el movimiento del barco en cada instante, y la posición del Flap y T-foil.

En el cuadro central superior se presentan los índices MSI y WVA en cada instante de la simulación.

Al terminar la simulación, apretando el botón "resultados" aparecen en pantalla los resultados finales obtenidos para los índices MSI y WVA.