

ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA ESTABILIZACIÓN DE NAVÍOS

Mendoza Lira, Felipe¹; felipemendozalira@gmail.com

Segovia Vera, Juan Pablo¹; jsegovia@udec.cl

1 - Universidad de Concepción, Calle Victoria, 631, Concepcion, Chile

I. RESUMEN

Este trabajo resume la modelación del movimiento del barco, los principales dispositivos y esquemas de control utilizados en la estabilización de navíos. Entre los dispositivos modelados se incluye los tanques anti-roll tipo U (anti-roll U-tank) y las superficies de control como son el timón (rudder) y aletas (fins).

Se resume la forma de evaluar los efectos del movimiento producido por el oleaje a través del índice de mareo MSI que relaciona las aceleraciones y frecuencias del movimiento vertical con el porcentaje de personas que vomita tras un determinado tiempo de exposición, también se presenta el índice de interrupciones MII que relaciona la fuerza lateral con el número de veces que esta causa deslizarse, pérdida de equilibrio o distracción.

Se implementa un algoritmo MPC (Model Predictive Control) específicamente un control basado en optimización cuadrática con restricciones que permite ser utilizado como autopiloto y/o la amortiguación del balanceo mediante el timón y/o aletas.

El uso de un observador con la inclusión de un bias en el ángulo de guiñada (desvío de la proa del buque hacia un lado u otro del rumbo en que se navega), permite una observación de los estados con buenos resultados filtrando el ruido presente debido al oleaje.

Se muestran los resultados comparativos entre las distintas configuraciones evaluando sus desempeños en modelos desarrollados en Simulink de Matlab®. Entre estas configuraciones están: el uso sólo de timón, el uso de aletas, el uso de tanques anti-balanceo tipo U pasivos y el uso de timón junto a aletas móviles.

Se desarrolla un modelo de realidad virtual para visualizar tanto las acciones de control como sus efectos en un una animación en 3D.

Los principales resultados de este trabajo son el simulador como una herramienta para evaluar los principales dispositivos utilizados para la amortiguación del balanceo, una comparación entre éstos permite conocer las capacidades o eficiencia de cada uno. La implementación del control MPC de la

manera presentada permite ser utilizarlo en distintas configuraciones (estabilización por el timón, por aletas o timón y aletas) sin modificaciones en el algoritmo.

Este trabajo forma parte del informe de memoria de título para optar al título de ingeniero civil electrónico con nombre “Estrategias de control para estabilización de navíos”¹.

II. TRABAJOS ANTERIORES

En el área de estabilización existen muchos trabajos que van desde el modelado de la dinámica del movimiento del barco como trabajos en el área de control y medición de sus efectos; podemos hacer referencia como principales trabajos los realizados por [3], [4] y [5]. En donde es posible hallar modelos tanto del barco y los distintos dispositivos presentes en ellos ya sea timones, hélices, aletas y tanques anti-balanceo.

Los trabajos previos dentro de la facultad en el ámbito de la ingeniería naval se encuentra “Estrategias de control optimo para sistemas de propulsión” [6] en donde se explica y desarrolla el modelo de un sistema de propulsión naval así como también las acciones de control necesarias para mantenerlo dentro de rangos de operación preestablecidos, otro trabajo es “Simulador interactivo 3D de un canal de pruebas para barcos” [7], en donde se presenta el modelado de la dinámica de un barco pero orientado al uso de CDF (Computational fluid dynamics) o fluidos dinámicos computacionales que son base para la obtención de modelos de control.

Los trabajos en el área de control de movimiento los trabajos de [8], [1], [3] y [9] son los trabajos más recientes, donde se presentan estrategias para la disminución de las aceleraciones.

Otros trabajos importantes son los realizados por Thor Fossen [10] y [11] que son base para muchos trabajos, además es uno de los realizadores junto a Tristan Perez de “MSS GNC Toolbox” y “MSS HYDRO” un toolbox libre para Matlab/Simulink con modelos de barcos y demostraciones

III. ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA ESTABILIZACION DE NAVIOS

En la actualidad son utilizados distintos tipos de dispositivos los utilizados para la amortiguacion del movimiento de un barco [1] en esta ocasión se desarrollan modelos y comentamos las siguientes:

- Aletas fijas cortas o largas (“Twins keels, bilge keels”)
- Tanques anti-balanceo pasivos o activos (“Passive or active anti-roll tank”)
- Amortiguación del balanceo mediante el timón (“Rudder roll damping”)
- Amortiguación del balanceo mediante el timón y aletas móviles (“Fins and rudder roll damping”)

¹ Memoria de Titulo escrita por Felipe H. Mendoza Lira presentada el 1 de Abril 2009 en la Universidad de Concepción, Chile

IV. SIMULADOR

Este capítulo describe el simulador implementado en simulink a partir de las ecuaciones del “**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**”, “**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**” y “Control de timón y/o aletas”.

4.1. Modelo del barco de prueba

De la Figura 7.1 el modelo del barco es subdividido en: el modelo hidrostático e hidrodinámico junto a las ecuaciones del modelo para el tanque anti-balanceo tipo U, modelo de propulsión, modelo de las fuerzas causas de la acción del timón y el modelo de las fuerzas causas de la acción de aletas fijas o móviles.

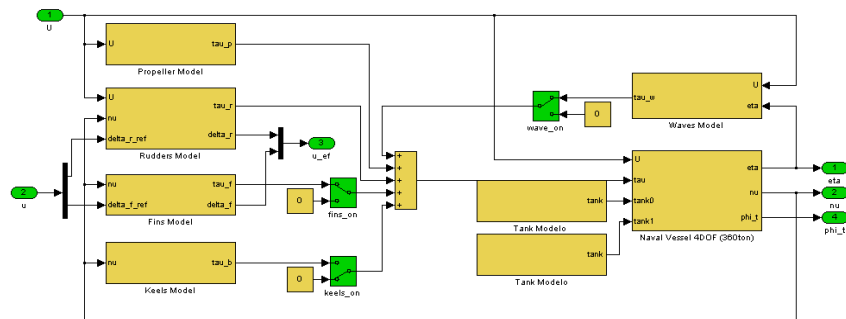


Figura 7.1 Modelo del barco en simulink

El modelo permite desactivar las aletas como los tanques dependiendo de la configuración deseada. También es posible activar y configurar el estado de la mar u oleaje a través del respectivo dialogo.

Para el desarrollo del simulador se ha considerado el trabajo presente en el toolbox de Matlab “MSS GNC toolbox” para la obtención de un espectro característico para las distintas condiciones de navegación para mayor información referirse a [3] para ver una descripción detallada de las olas y su descripción a través de Forces Response Amplitud Operador (Forces RAO) o Motions RAO.

4.2. Modelo de control MPC

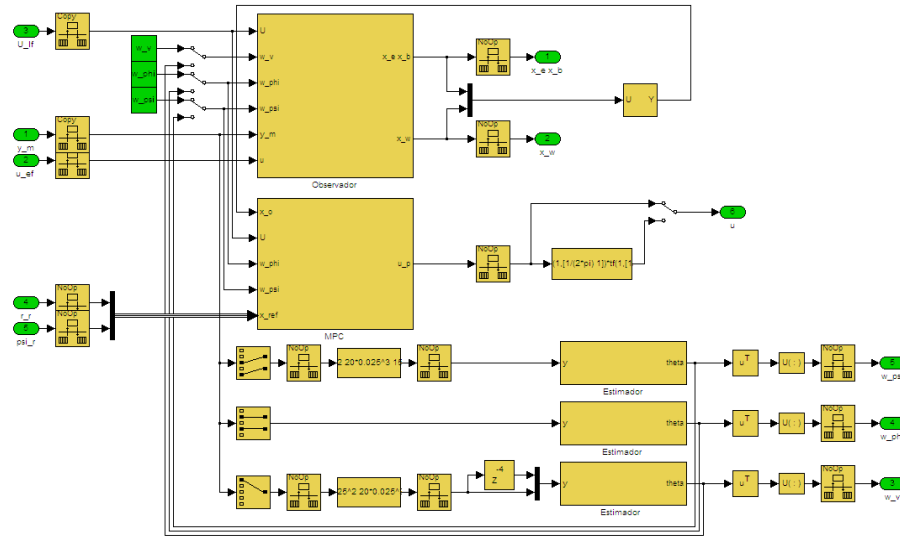


Figura 7.2 Modelo del controlador y observador en simulink

Este bloque implementa el estimador de parámetros; el observador de estados y control MPC.

4.3. Modelo principal

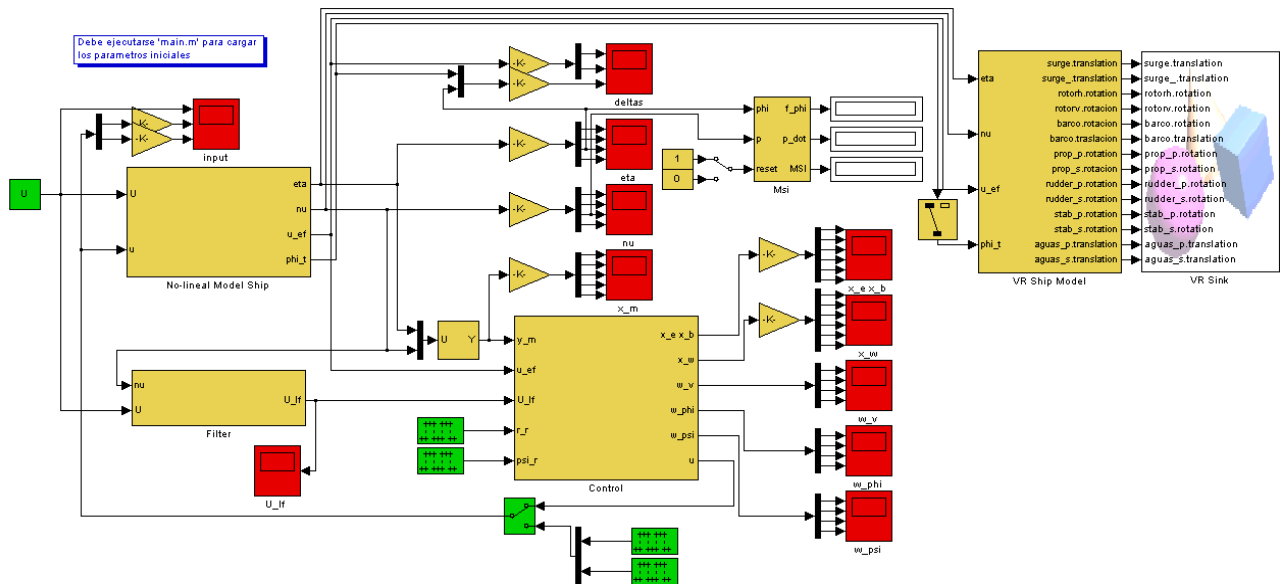


Figura 7.3 Modelo principal de Simulink

El modelo principal (Figura 7.3) incluye el modelo del barco y el control, además de ellos incluye el modelo de realidad virtual y un estimador de movimiento (MSI).

4.4. *Modelo de realidad virtual*

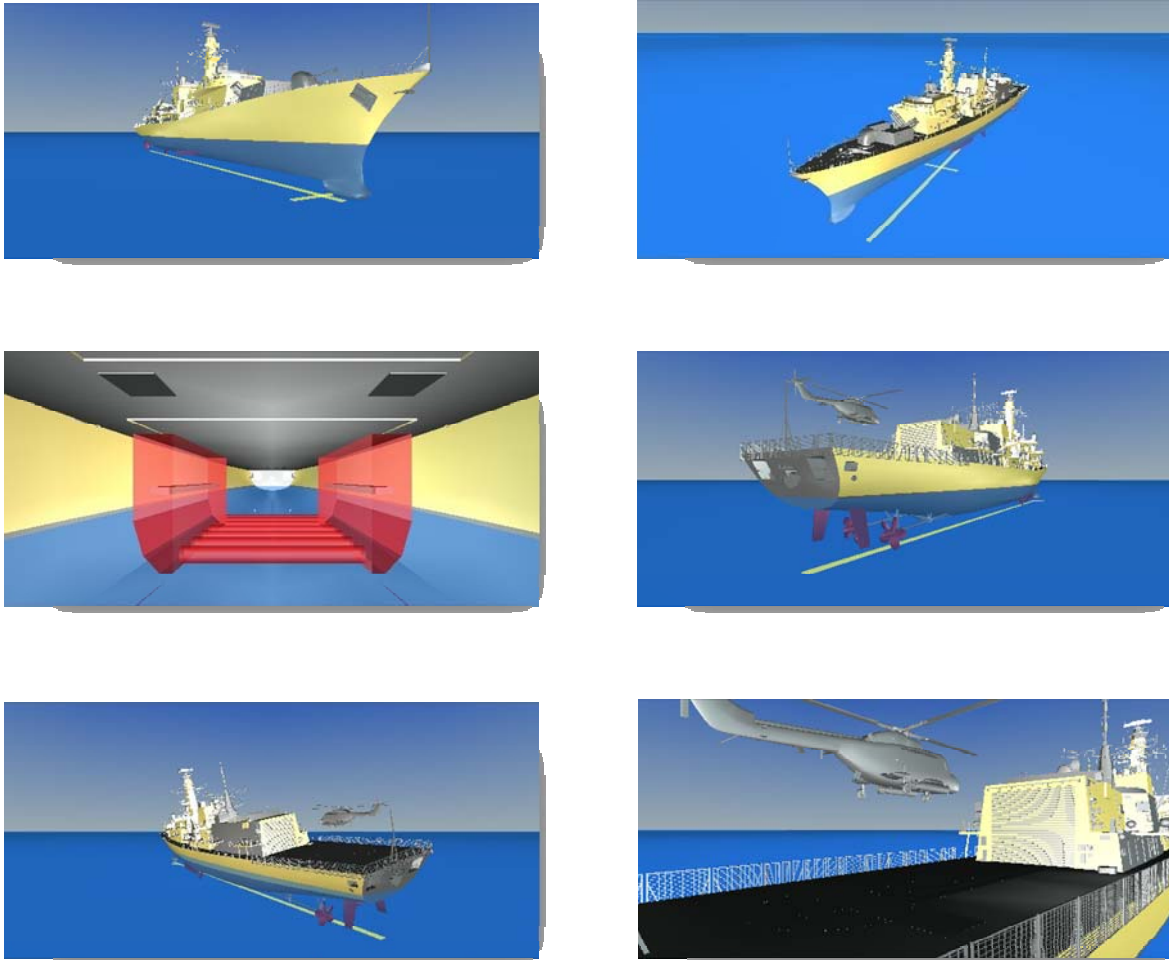


Figura A.1 Imágenes del modelo de realidad virtual diseñado para usar junto al modelo de simulink

V. SIMULACIONES

Para realizar una comparación de los distintos dispositivos y control consideraremos una velocidad de avance de 15 nudos y un ángulo relativo a proa 90° ; como primer caso estar en una mar del tipo SS5 que corresponde a olas de 4 metros y de periodo 7 segundos, y en una mar de del tipo SS6 olas de 6 metros y periodo 9 segundos.

5.1. *Respuesta a mar tipo SS5 barco con aletas fijas y autopiloto*

La primera simulación corresponde a aletas fijas también conocidas como keels o bilge keels dependiendo el tamaño y forma de estas. La Figura 8.1 muestra una comparación entre el barco con y

sin este dispositivo, donde las señales azules corresponde sólo al barco con autopiloto y la señal roja a el barco con las aletas fijas y el autopiloto.

Obtenida las simulaciones los índices de movimientos estimados arrojan una disminución promedio cercana al 30% de los índices de mareo e interrupciones (ver Tabla 8.1)

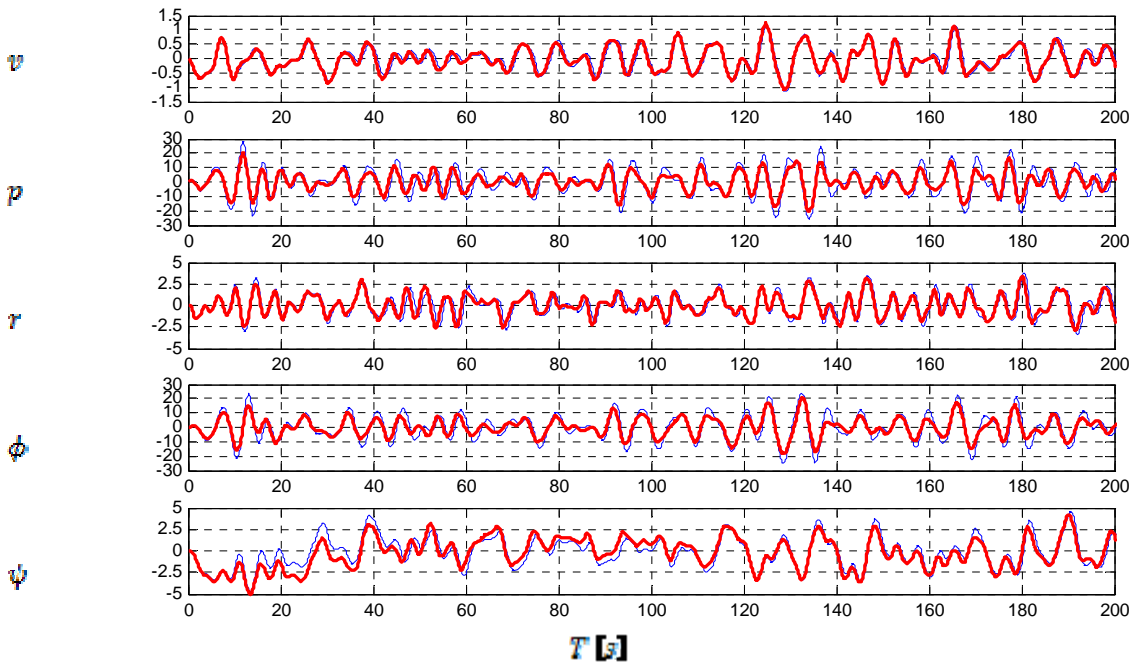


Figura 8.1 Respuesta a mar tipo SS5 barco con aletas fijas y autopiloto

5.2. Respuesta a mar tipo SS5 barco con tanque anti-balanceo, aletas fijas y autopiloto

La segunda comparación realizada corresponde al barco de prueba con aletas fijas, un tanque anti-balanceo tipo U y autopiloto descrito al inicio de este capítulo. La Figura 8.2 muestra la simulación considerando el tanque bloqueado de manera de poder identificar el efecto de la masa añadida por el tanque.

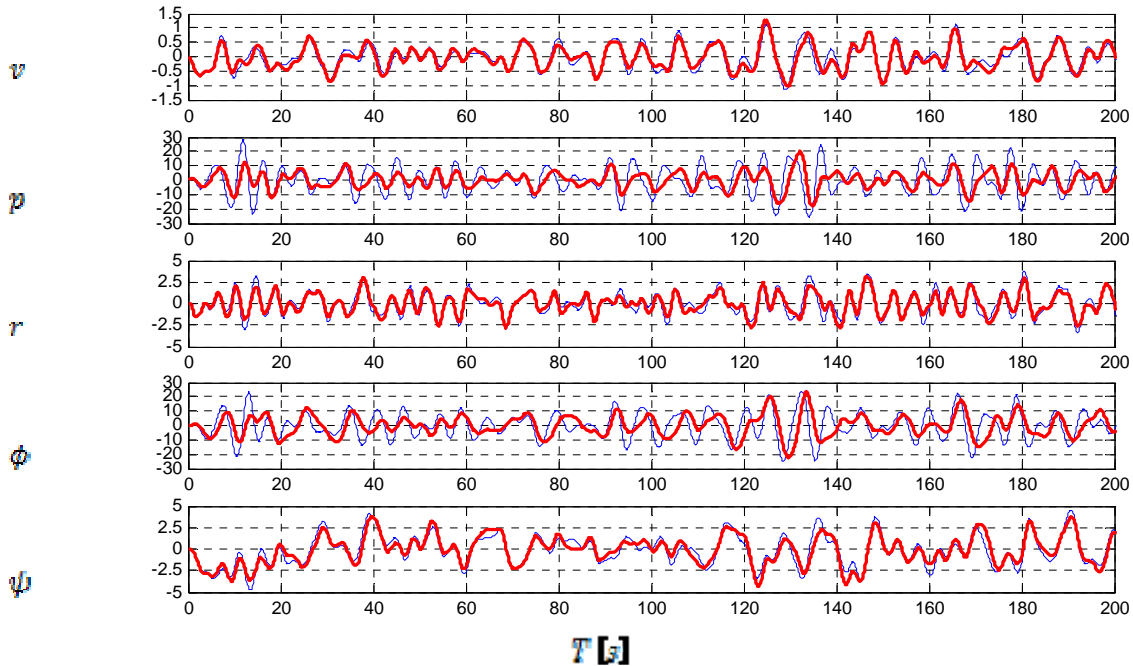


Figura 8.2 Respuesta a mar tipo SS5 barco con tanque anti-balanceo bloqueado, aletas fijas y autopiloto

Obtenida las simulaciones los índices de movimientos estimados arrojan una disminución promedio cercana al 60% de los índices de mareo y 40% en el índice de interrupciones (ver Tabla 8.1)

La siguiente simulación corresponde al tanque sin el bloqueo y sintonizado a la frecuencia de encuentro con las olas. En esta simulación los índices de movimientos estimados arrojan una disminución promedio cercana al 80% de los índices de mareo y 75% en el índice de interrupciones (ver Tabla 8.1). La Figura 8.3 muestra el resultado de la simulación en donde es observable a simple vista la disminución en los máximos tanto en el ángulo y velocidad en el movimiento de balanceo y una baja interferencia en otros movimientos.

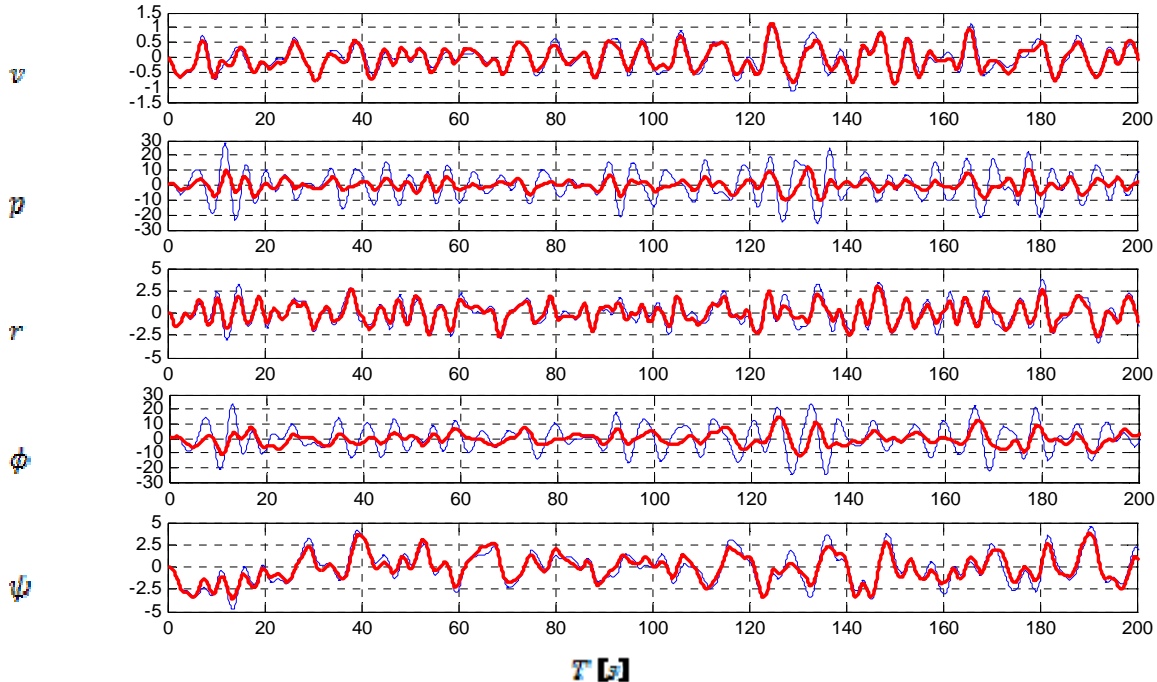


Figura 8.3 Respuesta a mar tipo SS5 barco con tanque anti-balanceo, aletas fijas y autopiloto

En la Figura 8.4 se presenta el comportamiento del tanque anti balanceo en color azul se muestra el ángulo de balanceo del barco y en rojo el ángulo correspondiente al liquido dentro del tanque. En la imagen es posible advertir el desfase entre los ángulos que es el principio en que se basa el diseño de estos tanques que fue descrito en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

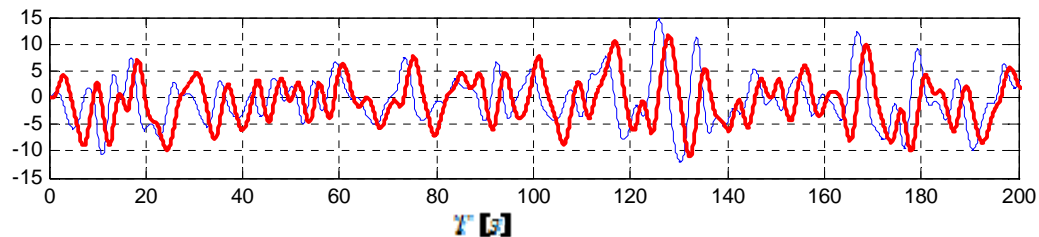


Figura 8.4 Angulo de balanceo y ángulo en tanque anti-balanceo

5.3. Respuesta a mar tipo SS5 para amortiguamiento mediante timón y autopiloto

La siguiente simulación corresponde al controlador diseñado en el capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, para ser utilizado en la configuración “amortiguamiento del balanceo mediante timón y autopiloto” se ha fijado un costo de 10^6 para el ángulo de las aletas, otra alternativa es fijar el valor máximo para las aletas en cero de manera de evitar su uso.

Los costos para el problema de optimización son $q_\psi = 0.1$, $q_{\text{rua}} = 0.01$, $q_{\text{r1}} = 10^6$, $q_\phi = 1$, $q_\tau = 10$, $q_\delta = 10$ y un horizonte de predicción de $N = 12$.

El resultado del uso del timón permite obtener una disminución promedio cercana al 90% del índice de mareo y un 100% en el índice de interrupciones (ver Tabla 8.1). La Figura 8.5 muestra el resultado obtenido considerando una velocidad en el cambio para el timón de $\dot{\delta}_{ru}^{max} = 20 \text{ deg/seg}$, de simulaciones realizadas al utilizar $\dot{\delta}_{ru}^{max} = 10 \text{ deg/seg}$ se obtiene un resultado similar, dado que, en la simulación la mayor tasa de cambio obtenida es $\dot{\delta}_{ru}^{max} = 9.6 \text{ deg/seg}$, por consiguiente al limitar más la velocidad de cambio, el control reduce su acción, en la Figura 8.6 se presenta el recorrido del timón, donde es posible observar la constante acción para evitar el balanceo, y mantener el rumbo.

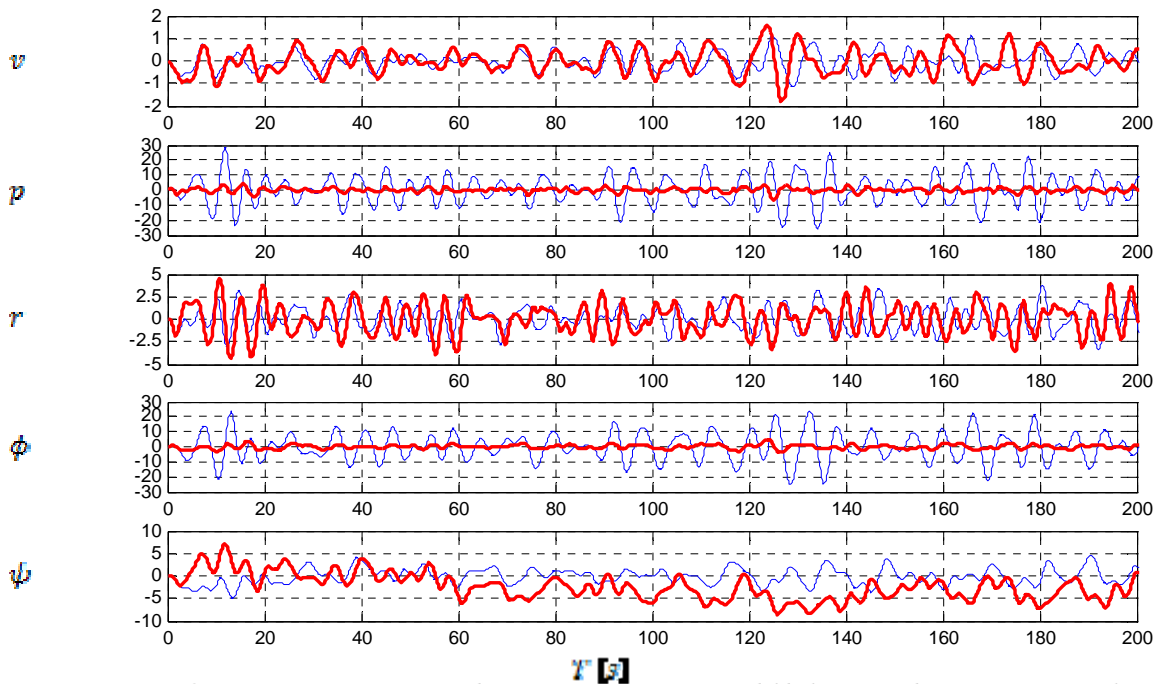


Figura 8.5 Respuesta a mar tipo SS5 barco con amortiguamiento del balanceo mediante timón y autopiloto

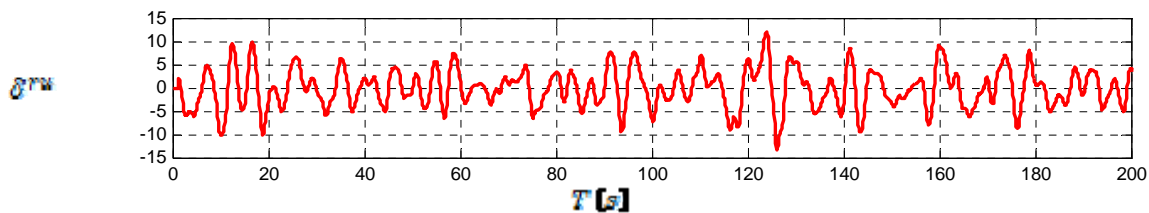


Figura 8.6 Acción de control del timón para amortiguamiento del balanceo mediante timón y autopiloto

5.4. Respuesta a mar tipo SS5 para amortiguamiento mediante timón y aletas, y autopiloto

La última simulación corresponde a el controlador desarrollado en el capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** con parámetros $q_{\dot{\phi}} = 0.1$, $q_{ru} = 0.1$, $q_{\dot{r}} = 0.01$, $q_{\phi} = 1$, $q_p = 10$, $q_{\psi} = 10$, $N = 12$, comportándose como un sistema de control del amortiguamiento mediante el timón y aletas y autopiloto.

El resultado del uso del timón y aletas permite obtener una disminución promedio cercana al 90% del índice de mareo y un 100% en el índice de interrupciones (ver Tabla 8.1). La Figura 8.7 muestra el resultado obtenido de la simulación donde es posible observar la disminución en el ángulo y velocidad de cambio similar a la configuración RRS + autopiloto, sin embargo, en esta ocasión la acción de control no afecta el rumbo significativamente (ver Tabla 8.1), en la Figura 8.8 se puede observar la acción de control respectiva.

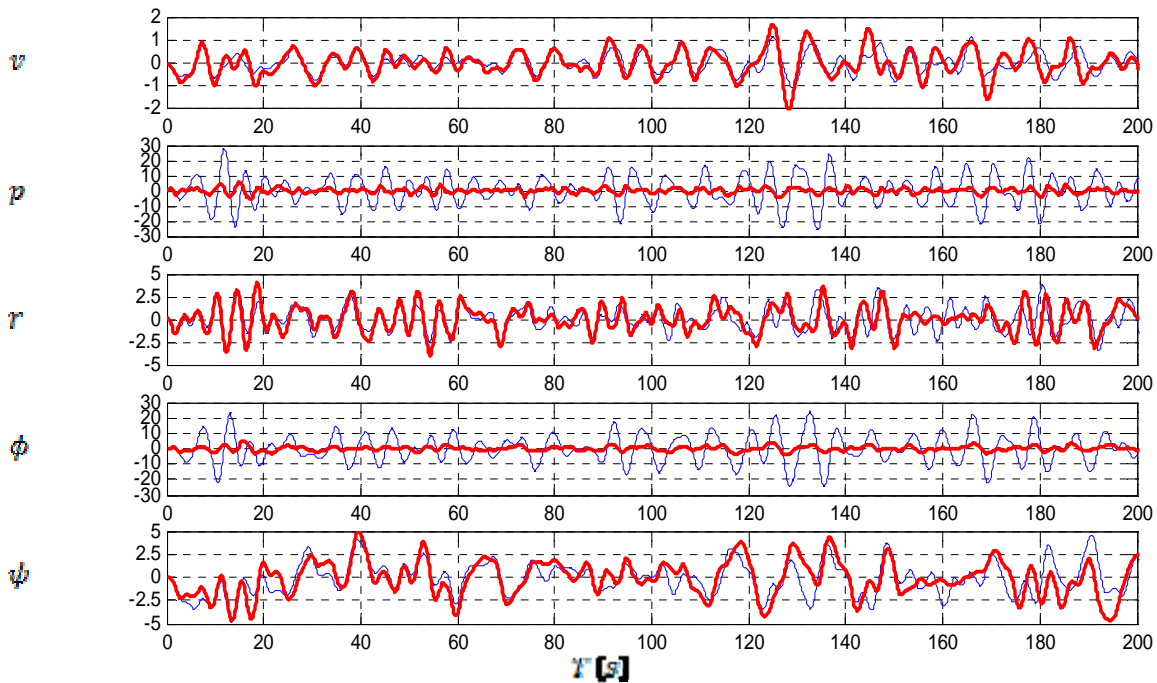


Figura 8.7 Respuesta a mar tipo SS5 barco con amortiguamiento del balanceo mediante timón y aletas y autopiloto

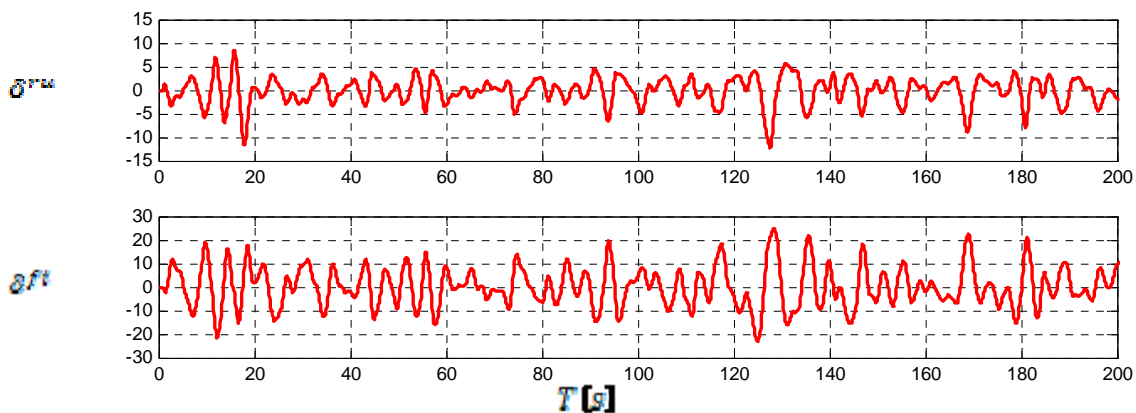


Figura 8.8 Acción de control del timón y aletas para amortiguamiento del balanceo mediante timón y aletas y autopiloto

5.5. Comparativa respuestas estado SS5

La Tabla 8.1 y Tabla 8.2, resumen y presentan información numérica de las simulaciones realizadas para la mar en estado SS5.

Tabla 8.1 Valores máximos y RMS obtenidos de las simulaciones para SS5

SIM	ϕ Max	p Max	\dot{p} Max	ϕ RMS	p RMS	\dot{p} RMS	ψ RMS	r RMS	δ^{r4} RMS	δ^{ft} RMS
-	deg	deg	deg	deg	$\frac{deg}{s}$	$\frac{deg}{s^2}$	deg	$\frac{deg}{s}$	deg	deg
I	33.54	29.68	39.07	9.52	9.57	11.04	1.88	1.49	0.22	0
II	27.25	26.02	29.28	7.27	7.00	8.10	1.82	1.36	0.16	0
III	23.75	21.97	26.47	7.99	6.31	6.24	1.63	1.24	0.23	0
IV	14.80	15.61	16.16	4.61	3.73	4.27	1.57	1.21	0.20	0
V	7.75	10.72	15.36	1.47	1.49	2.44	4.99	1.69	4.50	0
VI	6.86	8.14	11.87	1.55	1.68	2.75	1.89	1.46	2.94	9.48

Tabla 8.2 Índices de performance en las simulaciones para SS5

SIM	f_{ϕ}	MSI	MII	RED MSI	RED MII	RED ϕ	RED p	RED \dot{p}	RED prom.
-	rad/s	%	$\frac{int}{min}$	%	%	%	%	%	%
I	1.00	30.26	51.87	0	0	0	0	0	0
II	0.96	19.87	37.76	34.32	27.20	18.75	12.32	25.05	25.90
III	0.79	11.50	29.80	61.97	42.55	29.18	25.98	32.26	36.95
IV	0.80	5.31	12.85	82.43	75.23	55.88	47.39	58.62	55.40
V	1.01	1.33	0.17	95.58	99.66	76.89	63.87	60.68	66.14
VI	1.08	1.87	0.40	93.79	99.21	79.54	72.56	69.61	69.18

5.6. Comparativa respuestas estado SS6

La Tabla 8.3 y Tabla 8.4, resumen y presentan información numérica de las simulaciones realizadas para la mar en estado SS6. Se asumen las mismas condiciones presentadas para la mar en estado SS5.

Tabla 8.3 Valores máximos y RMS obtenidos de las simulaciones para SS6

SIM	ϕ Max	p Max	\dot{p} Max	ϕ RMS	p RMS	\dot{p} RMS	ψ RMS	r RMS	δ^{r4} RMS	δ^{ft} RMS
-	deg	deg	deg	deg	$\frac{deg}{s}$	$\frac{deg}{s^2}$	deg	$\frac{deg}{s}$	deg	deg
VII	37.0558	33.2516	49.7793	11.3243	10.9449	12.4050	2.3316	1.6977	0.3349	0
VIII	29.1505	25.9661	34.7903	8.9500	7.9635	8.8112	2.2148	1.5734	0.3303	0
IX	31.3111	23.9410	31.3585	10.9025	7.9522	7.2888	2.1571	1.5330	0.3341	0
X	18.6162	17.5378	20.7980	6.1359	4.5794	5.0208	2.1042	1.4976	0.3233	0
XI	8.0046	6.5906	22.6793	1.8500	1.6710	2.4426	5.3301	2.1628	6.0729	0
XII	10.1796	13.1158	21.0789	1.9603	1.8989	2.8605	2.7991	1.8001	3.8014	12.2011

Tabla 8.4 Índices de performance en las simulaciones para SS6

SIM	f_{ϕ}	MSI	MII	RED MSI	RED MII	RED ϕ	RED ρ	RED $\dot{\rho}$	RED prom.
-	rad /s	%	$\frac{MII}{MII_{lim}}$	%	%	%	%	%	%
VII	0.9665	34.5133	58.9410	0	0	0	0	0	0
VIII	0.8898	22.0104	42.5838	36.2264	27.7518	21.3335	21.9104	30.1109	29.9861
IX	0.7294	13.8573	37.0734	59.8496	37.1008	15.5028	28.0007	37.0050	35.7554
X	0.7463	6.8581	20.9052	80.1292	64.5320	49.7617	47.2574	58.2196	53.4675
XI	0.9033	1.2865	0.7123	96.2726	98.7915	78.3986	80.1795	54.4402	68.1325
XII	0.9687	2.1419	1.0795	93.7939	98.1685	72.5289	60.5559	57.6552	63.9637

VI. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

Tanques anti-balanceo son los más utilizados comúnmente para estabilizar movimientos de balanceo en barcos dado que estos pueden operar a bajas velocidades cuando el uso de aletas móviles no es práctico. Junto al uso de tanques anti balanceo, el uso de aletas, ya sea aletas cortas o largas, como elementos pasivos, representan una alternativa de bajo costo y con reducciones cercanas al 80% para el índice de mareo MSI y 70% en el índice de interrupciones MII.

La implementación de un sistema RRD presenta similares resultados a FRRD en cuanto a la reducción del balanceo dado que todo barco cuenta con un timón para ello, representa una alternativa de bajo costo si el servo del timón cuenta con una potencia y velocidad de cambio adecuada, agregando solo un mantenimiento extra dado su mayor uso, la reducción en el índice de mareo MSI obtenida es cercana al 90% y en el índice de interrupciones MII cercana al 100%.

El uso de aletas móviles se hacen requeridos en barcos militares o de lujo como una forma de mantener el control en toda situación de navegación, hay que considerar que además de controlar el balanceo las aletas son capaces de controlar las aceleraciones verticales producto de desplazamientos verticales, movimiento de arfada o cabeceo del barco, que en este caso no son considerados al trabajar en un modelo de 4DOF, esto ha sido desarrollado en [9] en un control del movimiento longitudinal como también en [23] con un control PD sobre el movimiento de arfada y el ángulo de cabeceo.

De las simulaciones obtenidas podemos apreciar el efecto de amortiguación en el balanceo de todos los dispositivos como de las estrategias de control y no puede ser ninguna descartada, su elección siempre estará relacionada al uso, tipo de barco a implementar y costos a asumir.

Un control MPC, en este caso un control cuadrático con restricciones, presenta grandes ventajas ya que se adecua completamente al modelo incluyendo todas sus limitaciones y características. Presenta un enfoque bastante intuitivo para ser implementado, su mayor debilidad está en que los modelos no sean suficientemente fiables produciendo poca robustez sin embargo bajo un adecuado diseño esto puede ser evitado. En la disminución de los índices de mareo MSI e índices de interrupciones MII, con el control MPC, tanto RRD como FRRD, es mayor al 90% llevando al barco a una situación completamente navegable con interrupciones cercanas a 1 por minuto e índices de mareo cercanas al 2% en estados SS5 y SS6.

La dinámica del barco pudo ser completamente representada en un simulador de realidad virtual permitiendo una visualización de esta en tiempo real (ver anexo B) con una gran semejanza a un modelo real.

VII. TRABAJOS FUTUROS

Los resultados obtenidos como las herramientas elaboradas permitirían realizar un simulador completo que incluyese la dinámica vertical como el movimiento de arfada del barco e incluir un control para mitigar sus efectos.

Se plantea el desarrollo de un control para maniobras a baja velocidad que incluye el uso conjunto propulsión de manera de aumentar el efecto de las superficies de control.

El modelo de tanque tipo-U puede extenderse a un control activo y permitir evaluar sus resultados.

Se puede complementar el simulador con la dinámica de un helicóptero permitiendo el desarrollo de sistemas de control coordinado para vehículos autónomos, hablamos de desarrollar sistemas que permitan la aproximación y abordaje en cualquier situación evitando posibles colisiones.

Este trabajo representa solo un trabajo teórico, y un paso hacia sistemas de control o amortiguamiento reales es el desarrollo de un canal de pruebas hidrodinámicas, de manera de validar, comprobar o implementar los futuros trabajos en nuestra casa de estudios.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. **Yang, Cheng'en.** *Robust Rudder Roll Damping Control*. Aalborg : Department of Control Engineering. Aalborg University, 1998.
- [2]. **Oda, H., Ohtsu, K. y Hotta, T.** *Statistical analysis and design of a rudder roll stabilization system*. s.l. : Control Eng. Practice, Vol. 4, No. 3, pp. 351-358, 1996.
- [3]. **Perez, Tristan.** *Ship Motion Control, Course Keeping and Roll Stabilisation Using Rudder and Fins*. Trondheim : Springer, 2005. ISBN-10: 1852339594.
- [4]. **Bertram, Volker.** *Practical Ship Hydrodynamics*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2000. ISBN 0 7506 4851 1.
- [5]. **Youssef, Khaled S., y otros.** *Roll Stabilization by Passive Anti-Roll Tanks Using an Improved Model of the Tank-Liquid Motion*. Blacksburg : Department of Engineering Science and Mechanics, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [6]. **Escobar, Cristian.** *Estrategias de Control Optimo para Sistema de Propulsión Naval*. Concepción : Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción, 2006.
- [7]. **González, José Patricio.** *Simulador Interactivo 3D de un Canal de Pruebas para Barcos*. Concepción : Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción, 2000.

- [8]. **Triantafyllou, Michael S. y Hover, Franz S.** *Maneuvering and Control of Marine Vehicles*. Cambridge : Department of Ocean Engineering Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [9]. **San Román, Segundo E.** *Modelado y Control del Movimiento Longitudinal de un Ferry de Alta Velocidad*. Madrid : Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática. Universidad Complutense de Madrid, 2002.
- [10]. **Fossen, Thor.** *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Trondheim : Marine Cybernetics, 2000.
- [11]. —. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. New York : John Wiley and Sons Ltd., 1994.
- [12]. **Yoon, Hyeon Kyu y Rhee, Key Pyo.** *Identification of hydrodynamic coefficients in ship maneuvering equations of motion by Estimation-Before-Modeling technique*. Shilim-dong : Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, 2003.
- [13]. **Pérez, Tristan y Blanke, Mogens.** *Mathematical Ship Modeling for Control Applications*. s.l. : Dept. of Electrical and Computer Engineering, The University of Newcastle, 2002.
- [14]. **Youssef, Khaled S., y otros.** *Design of passive anti-roll tanks for roll stabilization in the nonlinear range*. Blacksburg : Department of Engineering Science and Mechanics, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.
- [15]. **Moaleji, Reza y Greig, Alistair R.** *On the development of ship anti-roll tanks*. London : Department of Mechanical Engineering, University College London, 2005.
- [16]. **Zhang, Hong, y otros.** *Modeling and Simulation of Passively Controlled Anti-Rolling Tank*. Hangzhou, P.R. China : Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 15-19, 2004.
- [17]. **Treakle III, Thomas W.** *A Time-Domain Numerical Study of Passive and Active Anti-Roll Tanks to Reduce Ship Motions*. Blacksburg : Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
- [18]. **Nakayama, Yasuki.** *Introduction to Fluid Mechanics*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 1999. ISBN 0340676493.
- [19]. **Phairoh, Thongchai y Huang, Jen-Kuang.** *Adaptive ship roll mitigation by using a U-tube tank*. Norfolk : Department of Mechanical Engineering, Old Dominion University, 2006.
- [20]. —. *Modeling and Analysis of Ship Roll Tank Simulator Systems*. Norfolk : Department of Mechanical Engineering, Old Dominion University, 2004.
- [21]. **Wilson, P.A. y Tang, A.** *An investigation into lateral force estimator (LFE) stabilisation using the rudder*. Southampton : Department of Ship Science, Faculty of Engineering and Applied Science, University of Southampton, 1992. ISSN 0140 3818.
- [22]. **O'Hanlon, James y McCauley, Michael.** *Motion sickness incidence as a function of the frequency and acceleration of vertical sinusoidal motion*. California : Human Factors Research, Incorporated, 1972.
- [23]. **Aranda, J., Díaz, J.M. y Ruipérez, P.** *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*. Madrid : Dept. de Informática y Automática. UNED, 2000.