

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE ESTABILIZACIÓN DE UN BUQUE DE ALTA VELOCIDAD BASADOS EN TÉCNICAS QFT

Rocío Muñoz-Mansilla
ETSI Informática UNED, rmunoz@dia.uned.es

J.M. Martínez, D. Chaos, D. Moreno-Salinas, J. Aranda
ETSI Informática UNED, {josema, dchaos, dmoreno, jaranda}@dia.uned.es

Resumen

Este trabajo presenta el diseño de un sistema de control de estabilización de un buque de alta velocidad (BAV) para mejorar el confort y seguridad en el transporte marítimo. El objetivo es conseguir la amortiguación de las dinámicas acopladas de arfada, cabececeo y balance mediante el uso de superficies de estabilización activa (aletas de proa, de popa y laterales). La metodología empleada se basa en la técnica de control robusto en el dominio de la frecuencia denominada Teoría de la Realimentación Cuantitativa QFT (Quantitative Feedback Theory). En este trabajo se van a presentar dos aproximaciones, dependiendo del nivel de acoplamiento debido a la acción de los actuadores. En la primera solución, se considera un nivel de acoplamiento bajo y se diseñan de forma separada los controladores para las dinámicas longitudinal y transversal. En la segunda solución, se considera un nivel de acoplamiento alto debido a la acción de los actuadores. En este caso se emplea una combinación de la técnica QFT y Asignación de Autoestructuras (AE). Para las dos aproximaciones, los análisis de las simulaciones temporales para diferentes estados de la mar y ángulos de incidencia del oleaje demuestran resultados satisfactorios y se consigue el amortiguamiento. Se demuestra con ello que las técnicas de control robusto basadas en las metodologías QFT resultan factibles y apropiadas para el control de estabilización de sistemas marinos avanzados, pues resuelven la problemática en diferentes velocidades y ángulos de incidencia.

Palabras Clave: QFT, control de estabilización, buque alta velocidad, control robusto.

1 INTRODUCCIÓN

Un buque de alta velocidad en aguas calmadas puede realizar movimientos característicos como oscilaciones, y en aguas con oleaje puede sufrir grandes perturbaciones que provoca dificultades en el

movimiento y tareas ordinarias de los pasajeros y tripulación. Más específicamente, debido a la complicada naturaleza de las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre las naves de gran velocidad, estos vehículos se enfrentan a diferentes problemas de dinámica de inestabilidad en los dos planos verticales y transversales ([16]), tales como las oscilaciones en cabececeo (*porpoising*), en el balance (*chine-walking*), escora, inestabilidad en el balance inducida por el cabececeo, o una combinación de todos ellos.

La finalidad de este trabajo es el diseño de un sistema de control de estabilización para un buque de alta velocidad (BAV) como consecuencia de la acción perturbadora del oleaje y del acoplamiento entre las dinámicas longitudinal y transversal causado por los actuadores, cuando se consideran distintos ángulos de incidencia del oleaje.

Los tres modos del sistema analizados (Figura 1) son los movimientos de arfada y cabececeo (dinámica vertical o longitudinal), y balance (dinámica transversal u horizontal), dado que las aceleraciones verticales asociadas a estos movimientos son la principal causa del mareo ([17]). Los actuadores que se emplean para el control de los modos consisten en dos superficies estabilizadoras activas: una aleta de proa (*T-Foil*), dos aletas en popa (*flaps*) y dos aletas laterales (*fins*) para el control del balance.

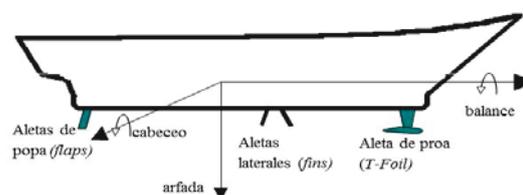


Figura 1: Modos de arfada, cabececeo y balance.

El acoplamiento de los tres modos se considera como una consecuencia de la acción de cada superficie de control cuando el oleaje incide con ángulo μ respecto a la dirección de rumbo diferentes de $\mu=180^\circ$ (conocido como mar de proa). Así, la acción del *T-Foil*, y la propia acción de control de cabececeo en sí misma, causan un acoplamiento con el modo de balance. En consecuencia, se produce un aumento en

la componente vertical de este movimiento. De igual forma, las superficies activas laterales (*fins*) que controlan la dinámica transversal del balance generan una componente en el modo de cabeceo.

Se plantea de esta forma un problema de control de estabilización de un sistema con estructura de un grado de libertad, multivariable (MIMO 3x3), con acoplamiento en tres movimientos, y con fuertes perturbaciones debido al oleaje.

El principal objetivo entonces es cómo diseñar los controladores para estas superficies activas, con el fin de conseguir una reducción del Índice de Mareo ([5]) que haga cumplir las especificaciones de estabilidad del sistema, reducción de los modos arfada, cabeceo y balance, y no saturación de los actuadores.

Este trabajo realiza dos aproximaciones. En primer lugar, se considera un nivel bajo acoplamiento causado por actuadores, donde se desprecian estos efectos del acoplamiento, y se realiza un diseño de un controlador para cada dinámica desacoplada. En la simulación, donde el acoplamiento sí es considerado, se comprueba que los controladores obtenidos son capaces de estabilizar el sistema completo, y por tanto la aproximación funciona.

Sin embargo, cuando el grado del acoplamiento debido a la acción de los actuadores es notable, los resultados de este primer enfoque no resultan eficientes, por lo que se debe buscar un nuevo diseño. En la segunda aproximación se plantea el problema de diseño robusto multivariable QFT de un sistema MIMO con tres modos fuertemente acoplados. En esta solución se plantea aplicar un nuevo enfoque que maneja el sistema de control robusto MIMO empleando una combinación de dos técnicas de control: asignación de autoestructuras EA y QFT. La técnica QFT ([2], [6], [8], [9], [17]) es una metodología de diseño robusto en el dominio de la frecuencia que hasta el momento no ha sido muy común en el diseño de sistemas de control de sistemas navales.

El trabajo se organiza de la siguiente forma: en la Sección 2, se describe el modelo de buque de alta velocidad y se plantea el problema de estabilización. En las Secciones 3 y 4 se muestran los resultados de la primera y segunda aproximación respectivamente. Las conclusiones se muestran en la Sección 5.

2 MODELO DEL BUQUE DE ALTA VELOCIDAD

Previo al diseño del control de estabilización, se han obtenido modelos matemáticos de los movimientos de arfada, cabeceo y balance para diferentes ángulos de incidencia de oleaje respecto a la dirección de rumbo μ , usando métodos de identificación de

sistemas ([13]). A su vez, las dinámicas de los actuadores (Figura 2(a)-(c)) son también modeladas.

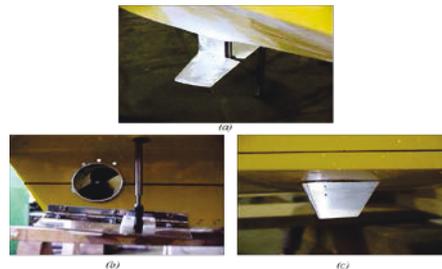


Figura 2: (a) aleta de proa (*T-Foil*), (b) aletas de popa (*flaps*), y (c) aletas laterales (*fins*).

El modelo del sistema tiene tres salidas: la velocidad angular de balance (ω_{roll}), y las aceleraciones verticales de arfada ($acvh$) y cabeceo ($acvp$). La entrada de perturbación es el oleaje. Las entradas de control son los ángulos de ataque del T-Foil (α_p), aletas de popa (α_H), y aletas laterales (α_R). Por tanto, se establece un problema de control con estructura de un grado de libertad de un sistema MIMO 3x3 con 3 entradas y 3 salidas. La Figura 3 muestra el diagrama de bloques de los tres modos, donde queda reflejada la idea del acoplamiento debido a los actuadores.

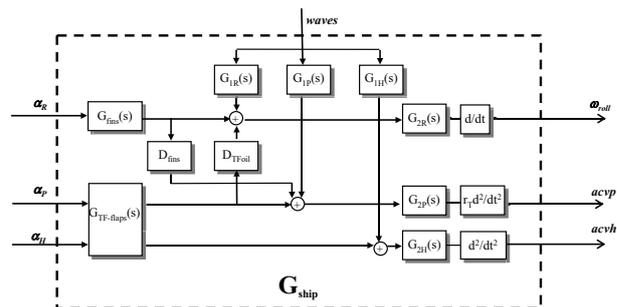


Figura 3: Diagrama de bloques de las dinámicas longitudinal y transversal de un BAV.

Las funciones de transferencia $G_{1H}(s)$, $G_{1P}(s)$ y $G_{1R}(s)$ tienen de entrada la altura de ola (m), y salidas la fuerza de arfada (KN), momento de cabeceo y momento de balance (KN·m) respectivamente. La función de transferencia $G_{2H}(s)$ conecta la fuerza de arfada (N) con el movimiento de arfada; $G_{2P}(s)$ el momento de cabeceo (KN·m) con el movimiento de cabeceo ($^\circ$); y $G_{2R}(s)$ el momento de balance con el movimiento de balance ($^\circ$). $G_{TF-flaps}(s)$ es la matriz de funciones de transferencia con los ángulos de ataque α_p ($^\circ$) y α_H ($^\circ$) como entradas; las salidas son la contribución a la fuerza de arfada (KN) y al momento de cabeceo (KN·m). $G_{fins}(s)$ es la función de transferencia con entrada el ángulo de ataque α_R ($^\circ$), y salida la contribución al momento de balanceo (KN·m). $D_{fms}(s)$ representa el acoplamiento entre los modos de balanceo y cabeceo; y $D_{TFoil}(s)$ el

acoplamiento entre los modos de cabeceo y balance. Las salidas son la velocidad angular de balance ω_{roll} , y las aceleraciones verticales asociadas al cabeceo $acvp$ y a la arfada $acvh$.

En el problema de estabilización robusta, se selecciona como modelo nominal el correspondiente al modelo del buque con un ángulo de incidencia de olas respecto a la dirección de rumbo de $\mu=135^\circ$, especificado en (1), un tipo de oleaje de interés en náutica, y conocido como mar de amura. La incertidumbre es la asociada a los modelos del buque identificados para olas incidentes diferentes al del caso nominal ([13]). El oleaje es la perturbación de entrada.

$$\begin{aligned} G_{1H}^0(s) &= 9333 \frac{26.02s^3 - 22.13s^2 + 160.9s^1 + 0.9}{s^4 + 125.4s^3 + 149.1s^2 + 181.3s^1 + 0.9} \\ G_{2H}^0(s) &= 1.06^{-4} \frac{0.44s^2 - 1.08s^1 + 3.015}{s^2 + 0.63s + 3.015} \\ G_{1P}^0(s) &= 18 \cdot 10^4 \frac{-1.42s^3 + 0.82s^2 - 12.6s}{s^4 + 5.25s^3 + 10.99s^2 + 15.5s^1 + 5.9} \\ G_{2P}^0(s) &= 4.22^{-6} \frac{-0.50s + 2.82}{s^2 + 0.49s + 2.71} \quad (1) \\ G_{1R}^0(s) &= 2794 \frac{-34.73s^3 + 79.6s^2 - 109s}{s^4 + 67.04s^3 + 125.8s^2 + 247.3s + 135.6} \\ G_{2R}^0(s) &= 1.2 \cdot 10^{-3} \frac{-1.9 \cdot 10^{-3}s^3 + 0.28s^2 + 0.29s + 3.5}{s^3 + 4.36s^2 + 1.41s^1 + 4.84} \end{aligned}$$

El planteamiento específico del problema es cómo diseñar los controladores con los siguientes objetivos:

- Estabilidad del sistema.
- Reducción de los movimientos arfada, cabeceo, y balance.
- Evitar la saturación en los actuadores T-Foil, aletas de popa y aletas laterales, esto es, el ángulo de ataque en ambos sentidos no debe ser mayor de 15° ($|\alpha_i| < \pm 15^\circ$).

La formulación del diseño del control en este trabajo se basa en la metodología de control robusto en el dominio de la frecuencia QFT, con incertidumbres en la planta y existencia de perturbaciones. La idea básica para el diseño de un control de un sistema MIMO consiste en dividir el proceso de diseño en una serie de sub-etapas ([17]). En cada sub-etapa de este proceso secuencial se plantea un subsistema SISO, en el cual los efectos de acoplamiento se tratan como perturbaciones de entrada. Una condición necesaria para la existencia de solución es que la planta sea de fase mínima. Sin embargo, el conjunto de plantas $G_{1H}(s)$, $G_{1P}(s)$ y $G_{1R}(s)$ de (1) presentan ceros en el semiplano derecho, y por tanto este método no es aplicable. En la literatura existen trabajos donde se proponen otras formas para tratar con el problema de fase no mínima, como por ejemplo ([3], [7], [10], [12]).

En este trabajo se plantean dos soluciones. La primera solución se basa en una consecuencia de teoría de sistemas lineales, y establece la aproximación de que en el sistema con oleaje de proa se puede considerar los modos vertical y horizontal desacoplados. De esta forma, primeramente se diseñan los controladores de las dos dinámicas consideradas desacopladas; después se verifica el control diseñado en el sistema acoplado por la acción de los actuadores. Para resolver el sistema MIMO se emplea la realimentación multi-lazo SISO ([9]).

Sin embargo, cuando los efectos del acoplamiento por los actuadores son notables, esta primera aproximación no da buenos resultados, por tanto es necesario buscar otro tipo de solución para reducir los movimientos longitudinales y transversales del sistema del buque de alta velocidad.

En este trabajo, se considera un valor asociado al grado de acoplamiento, denotado por γ . Así, cuando el grado de incidencia del oleaje es diferente de $\mu=180^\circ$, suponemos que el T-Foil ejerce una fuerza con una componente en el modo de balance D_{TFoil} , que se estima como la proyección del vector momento \vec{M}_P sobre el plano XZ, tal como queda descrito en la Figura 4. Se ha podido estimar que a partir de un grado de acoplamiento $\gamma > 10^\circ$, el efecto del acoplamiento cruzado es notable. De forma similar, se realiza la misma hipótesis sobre el momento que ejercen las aletas laterales sobre el modo de cabeceo.

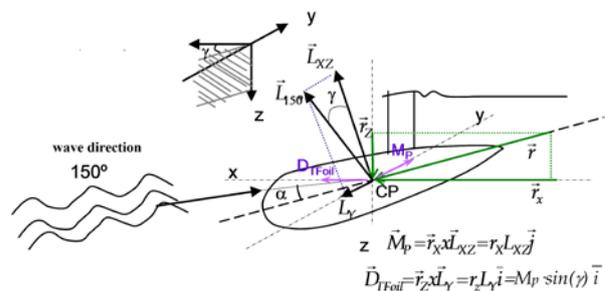


Figura 4: Momento de balance D_{TFoil} generado por el T-Foil cuando el grado de incidencia es en $\mu = 150^\circ$

De esta manera, la segunda aproximación manejará el sistema de problema de control robusto de estabilización del sistema MIMO del BAV empleando una combinación de la técnica QFT con la técnica de asignación de autoestructuras (EA). Con un adecuado diseño de asignación de autoestructuras ([1]), se puede conseguir un buen desacoplamiento para el modelo de la planta nominal, que da lugar a la transformación del sistema MIMO en tres sistemas SISO desacoplados. Tras este proceso, la metodología SISO QFT es empleada para tratar el problema de robustez y conseguir que las respuestas

del sistema bajo incertidumbres converjan dentro de las respuestas de la planta nominal.

3 PRIMER DISEÑO. CONTROL QFT.

En la primera aproximación, se realiza por un lado el diseño del control de la dinámica longitudinal y por otro lado el diseño del control de la dinámica transversal. A continuación, se analiza el sistema global para verificar si los controladores diseñados cumplen las especificaciones requeridas y por tanto consiguen la amortiguación en las condiciones de bajo grado de acoplamiento debido a los actuadores.

Para el diseño de los controladores, se va a trabajar con dos variables de salidas (Figura 3): la aceleración vertical asociada a la arfada y cabeceo ($acv = acvh + acvp$); y la velocidad angular de balance (ω_{roll}). Las entradas de control son: el ángulo de ataque del T-Foil (α_p) y el ángulo de ataque de las aletas laterales (α_R). El ángulo de ataque de las aletas de popa se consideran fijas al valor $\alpha_H = 7.5^\circ$; por tanto no es una variable de control.

La técnica de control QFT se desarrolla sobre un ciclo iterativo de las fases básicas de diseño/implementación/rediseño. Con el fin de evaluar y comparar la amortiguación de los modos, se definen dos funciones de coste $J_{\omega_{roll}}$ (2) y J_{acv} (3), que se calculan a partir del valor medio de ω_{roll} y acv respectivamente, medidos en una prueba de simulación temporal.

$$J_{\omega_{roll}} = \overline{\omega_{roll}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\omega_{roll}(t_i)|; \quad (2)$$

$$J_{acv} = \overline{acv} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |acv(t_i)| \quad (3)$$

3.1 DINÁMICA LONGITUDINAL. DISEÑO QFT

La Figura 5 muestra la configuración básica del control de la dinámica longitudinal, donde $G_{pPitch}(s) = G_{TFoil40}(s) \cdot G_{2p}(s) \cdot G_{der2}(s)$, y donde $G_{der2}(s)$ es la derivada segunda (Figura 3).

El objetivo es el diseño del controlador $G_{cAcv}(s)$ que garantice que el actuador genera un momento que contrarreste el momento generado por el oleaje sobre el buque. Así, la entrada de control es la señal de error diferencia entre la aceleración vertical de referencia ($ref_{acv} = 0 \text{ m/s}^2$) y la medida de la salida de la aceleración vertical (acv). La salida de control es el ángulo de ataque α_p enviado al T-Foil, y el problema consiste en diseñar $G_{cAcv}(s)$ de forma que se satisfice simultáneamente la estabilización del

conjunto de plantas $\{G_{pPitch}(s)\}$ y reduce el nivel de salida debido a las perturbaciones.

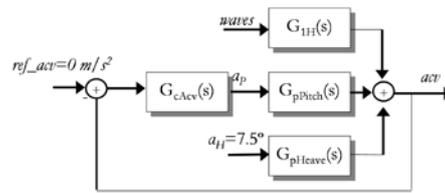


Figura 5. Diagrama de bloques del subsistema en lazo cerrado de la dinámica longitudinal.

Siguiendo el formalismo de la metodología QFT, el problema se formula de la siguiente forma: sea el sistema de la Figura 5, donde $G_{pPitch}(s)$ es una planta que pertenece al conjunto de plantas $\{G_{pPitch}(s)\}$, y d_p es una perturbación definida por $G_{Tp}(s)$ ([13]). El vector especificación viene dado por $e_i(\omega)$, y ω_h es la frecuencia tal que las especificaciones se aplican para todo $\omega < \omega_h$. Diseñar un controlador $G_{cAcv}(s)$ tal que para todo $G_{pPitch}(s) \in \{G_{pPitch}(s)\}$:

- i) El sistema es estable;
- ii) Para toda perturbación, la salida cumple:

$$|acv(j\omega)| \leq e_1(\omega); \quad \omega \leq 3 \quad (4)$$

Las especificaciones en lazo cerrado en el dominio de la frecuencia empleadas son la estabilidad de los márgenes de fase y ganancia λ_p ; y la sensibilidad robusta o rechazo a perturbaciones de salida δs . El parámetro de margen de estabilidad $\lambda_p = -1.9 \text{ dB}$, seleccionado de forma arbitraria, implica unos valores de margen de ganancia $GM = 7.04 \text{ dB}$ y de margen de fase $PM = 77.36^\circ$, y significa que se cumple la siguiente desigualdad para todas las frecuencias:

$$\left| \frac{G_{pPitch} G_{cAcv}}{1 + G_{pPitch} G_{cAcv}} \right| \leq \lambda_p = 0.8 = -1.9 \text{ dB}; \quad \omega \geq 0, \forall G_{pPitch} \in \{G_{pPitch}\} \quad (5)$$

Para la especificación de sensibilidad robusta, se calculan los límites para frecuencias bajas ($\omega \leq 3 \text{ rad/s}$). El controlador garantizará una adecuada reducción de sensibilidad en su margen de frecuencia:

$$\left| \frac{acv}{d_p} \right| = \left| \frac{1}{1 + G_{pPitch} G_{cAcv}} \right| \leq \left| \frac{1}{1 + G_{pPitch} (2 \cdot (s - 5.7) / s)} \right|; \quad 0 < \omega \leq 1.5 \quad (6)$$

$$\left| \frac{acv}{d_p} \right| = \left| \frac{1}{1 + G_{pPitch} G_{cAcv}} \right| \leq \left| \frac{1}{1 + G_{pPitch} \frac{-1.2(s + 3.8)}{s^2 / 27.3^2 + s / 27.3 + 1}} \right|; \quad 1.5 \leq \omega < 3 \quad (7)$$

Finalmente, el controlador diseñado es un filtro de cuarto orden:

$$G_{cAcv}(s) = -10 \frac{\left(\frac{1}{1.7^2} s^2 + \frac{1.26}{1.7} s + 1 \right) \left(\frac{1}{2.79} s + 1 \right) \left(\frac{1}{6.05} s + 1 \right)}{\left(\frac{1}{0.48^2} s^2 + \frac{0.4}{0.48} s + 1 \right) \left(\frac{1}{8.2^2} s^2 + \frac{0.32}{8.2} s + 1 \right)} \quad (8)$$

3.2 DINÁMICA TRANSVERSAL. DISEÑO QFT

La Figura 6 describe la configuración básica del control de realimentación de la dinámica transversal, donde $G_{pRoll}(s) = G_{fins}(s) \cdot G_{2R}(s) \cdot G_{der}(s)$, y $G_{der}(s)$ es la derivada primera.

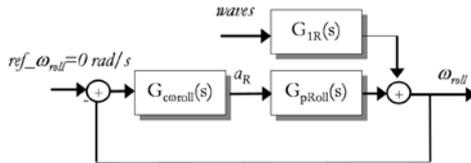


Figura 6. Diagrama de bloques del subsistema en lazo cerrado de la dinámica transversal

Las especificaciones del diseño QFT que se fijan garantizan unos márgenes de ganancia y fase apropiados $\lambda_r = 1.8$ y reducción de sensibilidad $\delta_s = 1.6$, que implican el cumplimiento de las siguientes desigualdades:

$$\left| \frac{G_{pRoll} G_{coroll}}{1 + G_{pRoll} G_{coroll}} \right| \leq \lambda_r = 1.8 = 5.1 \text{ dB}; \quad \omega \geq 0, \quad \forall G_{pRoll} \in \{G_{pRoll}\} \quad (9)$$

$$\left| \frac{\omega_{roll}}{d_r} \right| = \left| \frac{1}{1 + G_{pRoll} G_{coroll}} \right| \leq \frac{e_2}{|d|} \equiv \delta_s = 1.6; \quad 0 < \omega \leq 3 \quad \forall G_{pRoll} \quad (10)$$

El controlador diseñado es un filtro de primer orden:

$$G_{cCoroll}(s) = 1.23 \frac{\left(\frac{1}{0.64} s + 1 \right)}{\left(\frac{1}{0.41} s + 1 \right)} \quad (11)$$

3.3 EVALUACIÓN DEL SISTEMA GLOBAL ACOPLADO

La Tabla 1 muestra los valores de la reducción obtenida con los controladores $G_{cAcv}(s)$ y $G_{oroll}(s)$ en la aceleración vertical acv , en la velocidad angular de roll ω_{roll} , y en los modos de cabeceo, arfada y balance, así como las funciones de coste J_{acv} y J_{oroll} para velocidad del buque $V=40$ nudos, olas irregulares de estado de la mar $SSN=5$ y ángulo de incidencia entre $\mu = 105^\circ$ y 180° .

También se analizan las respuestas temporales del sistema acoplado. La Figura 7 compara la velocidad angular de roll con y sin control para el caso particular $SSN=5$ y $\mu = 150^\circ$. Se demuestra por tanto que los controladores $G_{cAcv}(s)$ y $G_{cCoroll}(s)$ reducen tanto el movimiento vertical como el horizontal cuando se considera el sistema global acoplado.

Sin embargo, si consideramos un efecto de acoplamiento significativo, este diseño no resulta efectivo. Por ejemplo, para el caso de $\mu=150^\circ$ y $SSN=5$, y $\gamma_{T-FOIL} = \gamma_{FINS} = 8^\circ$, el porcentaje de reducción es 0.60% y 2.00% respectivamente. Cuando $\gamma_{T-FOIL} = \gamma_{FINS} = 15^\circ$, el valor es -10.90% and -52.11 %, por tanto no se consigue amortiguación, y se debe analizar otro tipo enfoque.

Tabla 1: Primera aproximación. Valores de J_{acv} y J_{oroll} y reducción en acv y ω_{roll} , cabeceo, arfada y balance. $V=40$ nudos, $SSN=5$.

	$\mu(^\circ)$	J_{acv}	J_{oroll}	Porcentaje de reducción (%)				
				acv	ω_{roll}	Cabeceo	Arfada	Balance
SSN=5	105°	2,23	2,63	5,1	3,49	8,0	2,7	10,7
	120°	2,22	1,93	11,0	23,9	9,8	2,6	27,1
	135°	2,01	1,49	10,8	31,5	10,4	1,1	29,5
	150°	2,14	1,30	11,95	18,0	10,7	1,7	25,3
	165°	2,11	0,73	10,47	30,6	10,7	1,7	29,2
	180°	1,07	0,41	5,38	-65,8	4,7	-0,3	-214,0

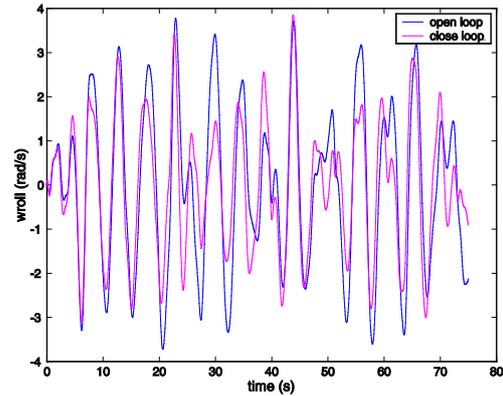


Figura 7. Comparación de ω_{roll} con y sin control en el sistema global acoplado. $SSN=5$ y $\mu = 150^\circ$. Primera aproximación.

4 SEGUNDO DISEÑO. CONTROL COMBINADO QFT Y EA

Tal y como se ha señalado anteriormente, el problema de estabilización MIMO es tratado primeramente mediante la técnica de asignación de autoestructuras EA, que permite la descomposición del sistema MIMO en tres sistemas SISO desacoplados a resolver con la metodología QFT, que se emplea para hacer converger las respuestas del sistema de plantas con incertidumbres en la respuesta de la planta nominal.

4.1. DISEÑO EA

La técnica EA ([1]) es una técnica de diseño de control multivariable, donde tanto las dinámicas del

transitorio como sus relaciones de acoplamiento pueden ser mejoradas a través de una asignación apropiada de las autoestructuras en lazo cerrado, bien por control por realimentación de estados o de salida ([14]). Esta técnica se ha empleado de forma extensa en el diseño de sistemas de control de vuelo, como por ejemplo en los trabajos ([4], [15]).

La técnica EA se aplica sobre un modelo concreto, por lo que en este trabajo se aplicará sobre el modelo de la planta nominal, correspondiente al modelo identificado en la ecuación (1). El principio básico es asignar los autovalores y autovectores del sistema de control en lazo cerrado a sus valores especificados a través de estrategias de realimentación. Esta técnica requiere el modelo del sistema expresado en ecuaciones en el espacio de estado, por lo que la matriz de funciones de transferencia debe traducirse en la forma:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A \cdot x + B \cdot u \\ y &= C \cdot x \end{aligned} \quad (12)$$

donde el vector de entrada es $u = [\alpha_R, \alpha_P, \alpha_H]^T$ y el vector salida $y = [\omega_{roll}, acvp, acvh]^T$.

En los trabajos ([1], [14]) se realiza un estudio detallado sobre los algoritmos para la obtención de la matriz de ganancia K , de manera que los autovalores y autovectores de la matriz del sistema en lazo cerrado $A - BKC$ que se obtiene al emplear la ley de control $u = -K \cdot y$, consiguen el comportamiento desacoplado deseado. Como en este caso particular se tienen tres entradas ($n_u = 3$), según este método, se pueden modificar tres autovalores del sistema en lazo cerrado. Como el número de salidas es $n_y = 3$, se podrán asignar arbitrariamente tres elementos en cada autovector. Finalmente, a partir de estos algoritmos, la matriz de ganancia K para el caso nominal que se obtiene es

$$K = \begin{pmatrix} 0.047 & -8.6526 & 1.3301 \\ -0.0037 & -3.6554 & 0.5620 \\ 0.0947 & -9.1661 & 1.3670 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Con el diseño realizado, se demuestra que los efectos del acoplamiento en los modelos de balance y cabeceo se han hecho más débiles. Sin embargo, el acoplamiento para otros ángulos de incidencia diferentes al caso nominal, pueden tener efectos bastante más notorios. Por tanto, con el fin de conseguir comportamientos robustos frente a los efectos de los actuadores a diferentes ángulos incidentes, en primer lugar, y a las incertidumbres en los parámetros del modelo sobre la envergadura del oleaje en segundo lugar, se propone un diseño de control robusto tal y como ofrece la técnica QFT.

4.2. DISEÑO QFT PARA LOS RESULTADOS DEL DISEÑO EA

A partir de los resultados del diseño de asignación de autoestructuras, el diseño QFT se enfrenta al sistema en lazo cerrado descrito en la Figura 4. Las matrices en el espacio de estados serán las siguientes:

$$A_c = A - BKC; B_c = B; C_c = C \quad (14)$$

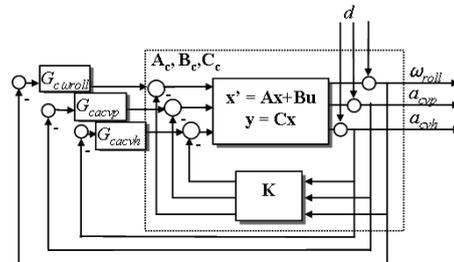


Figura 8: Sistema buque en cascada con control EA/QFT combinados.

Con el propósito de realizar un diseño QFT, el modelo de la planta en ecuaciones de estado (12) es transformado de nuevo a funciones de transferencia. La matriz de funciones de transferencia del sistema en lazo cerrado para el caso nominal tendrá la siguiente forma:

$$P = C_c (sI - A_c)^{-1} B_c = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{pmatrix} \quad (15)$$

Como tras la asignación de autoestructuras se han conseguido las respuestas desacopladas de arfada, cabeceo y balance para el caso nominal, se va a realizar la consideración de que las funciones de transferencia referentes al acoplamiento cruzado son aproximadamente cero, esto es, $P_{ij} (i \neq j) = 0$. Por tanto se tendrán en cuenta tres sistemas SISO independientes (P_{11}, P_{22}, P_{33}).

Cada sistema de control SISO se diseñará con la metodología QFT. En cada caso, se aplicarán las especificaciones de estabilidad y demás características de rendimiento robustas que garanticen unos márgenes de ganancia y sensibilidad suficientemente robustos por las incertidumbres en los parámetros de la planta del buque debido a los diferentes ángulos de incidencia, y un adecuado rechazo a perturbaciones de entrada en la planta generadas por el oleaje.

4.2.1. Diseño QFT para la dinámica del subsistema de balance

Las especificaciones para estabilidad robusta ($\lambda_{11} = 1.2$) y límites de rendimiento robustos ($\delta_{s11} = 1.4$) fijados para el diseño QFT garantizan unos márgenes de ganancia y reducción de sensibilidad adecuados.

$$\left| \frac{P_{11}G_{coroll}}{1+P_{11}G_{coroll}} \right| \leq \lambda_{11} = 1.2, \quad \omega \geq 0 \quad (16)$$

Las fronteras a baja frecuencia ($\omega \leq 3$ rad/s) se calculan para satisfacer la desigualdad de rechazo a perturbaciones. Esta desigualdad queda de la forma:

$$\left| \frac{1}{1+P_{11}G_{coroll}} \right| \leq \delta_{s11} = 1.4; \quad \omega \leq 3 \text{ rad/s} \quad (17)$$

Finalmente, el controlado es un filtro de segundo orden:

$$G_{coroll}(s) = 1.5 \frac{(1.72s + 1)}{(0.03s^2 + 0.16s + 1)} \quad (18)$$

4.2.2. Diseño QFT para la dinámica del subsistema de dinámica vertical

Para el diseño de G_{cAcvp} y G_{cAcvh} , se lleva a cabo el mismo procedimiento de diseño QFT SISO. Los controladores que se obtienen son:

$$G_{acvp}(s) = 3.1 \frac{(38.5s + 1)}{(28.57s + 1)(0.08s + 1)} \quad (19)$$

$$G_{acvh}(s) = 5.4 \frac{(0.17s^2 + 0.22s + 1)}{(0.12s^2 + 0.03s + 1)(0.28s + 1)} \quad (20)$$

4.3. EVALUACIÓN DEL SISTEMA GLOBAL ACOPLADO

Con el fin de comprobar la eficiencia de los controladores se desarrolla un modelo que simula el comportamiento de las dinámicas del buque en lazo cerrado. La Tabla 2 muestra los valores de porcentaje de reducción con respecto a la respuesta en lazo abierto obtenidos, para el caso particular de $V=40$ nudos y $SSN=5$.

Tabla 2: Valores de $J_{\omega roll}$, J_{acvp} , J_{acvh} y, y reducción en ω_{roll} , a_{cvp} , a_{cvh} . $V=40$ nudos, $SSN=5$. Segunda aproximación.

	μ (°)	$J_{\omega roll}$	J_{acvp}	J_{acvh}	Porcentaje de reducción (%)		
					ω_{roll}	a_{cvp}	a_{cvh}
SSN=5	105	2,84	0,93	1,43	1,1%	34,3%	3,3%
	120	1,71	0,96	0,89	40,4%	45,7%	6,0%
	135	1,06	1,01	0,89	87,2%	49,4%	5,0%
	150	1,20	1,19	0,81	28,7%	46,7%	7,1%
	165	0,67	1,07	0,78	12,4%	46,7%	7,1%
	180	0,81	0,69	0,46	50,8%	14,4%	0,01%

Como se puede observar, existe una notable variación entre las medidas obtenidas, que se puede entender por varios motivos. En primer lugar, cabe decir que los modelos identificados se realizan a partir de datos en frecuencia medidos en un modelo a

escala, donde se observó que para ciertos ángulos estas medidas no eran totalmente fiables ([13]). En segundo lugar, debido a la metodología de diseño empleada, primero se realiza un desacoplamiento sobre el caso nominal, que es donde se observa claramente mayor reducción. Por otro lado, el objetivo intentó ser conseguir una única ley de control para todos los casos, hecho que dificultó el diseño para conseguir reducción y no saturación para todos los modelos.

Por otra parte, la Figura 9 muestra una comparativa en lazo abierto y cerrado de la velocidad angular de balance ($\omega_{roll}(t)$) para el caso $SSN=5$ y ángulo de incidencia entre oleaje y dirección de rumbo $\mu=150^\circ$.

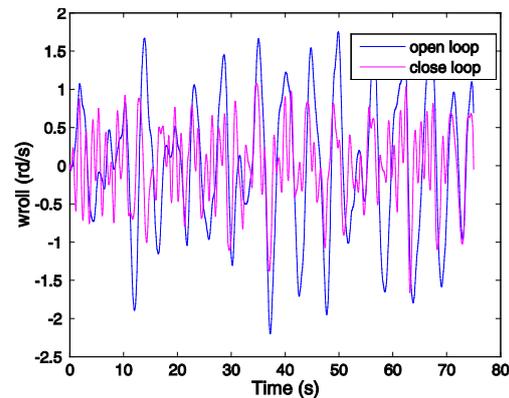


Figura 9. Comparación de ω_{roll} con y sin control en el sistema global acoplado. $SSN=5$ y $\mu=150^\circ$. Segunda aproximación.

5 CONCLUSIONES

Este trabajo ha estudiado el problema de estabilización de un buque de alta velocidad con tres modos acoplados. Se han desarrollado dos tipos de soluciones dependiendo del grado de acoplamiento generado por la acción de los actuadores (aleta de proa o T-Foil, aletas de popa y aletas laterales). La metodología empleada se basa en técnicas de control robusto QFT. El sistema del buque de alta velocidad es un sistema multivariable acoplado que resulta apropiado para el diseño de control QFT, pues presenta incertidumbre en la planta (la respuesta del sistema a diferentes ángulos de incidencias del oleaje) y perturbaciones (oleaje).

La primera aproximación considera un bajo nivel de acoplamiento. Se realiza un diseño de controladores para cada dinámica independientemente, y se prueban estos controladores sobre el sistema global considerando los acoplamientos. El diseño consigue la amortiguación de las dos dinámicas transversal y longitudinal.

Sin embargo, es necesario un segundo enfoque para los casos en los que el grado de acoplamiento es significativo. En este caso se realiza un diseño basado

en la combinación de QFT y asignación de autoestructuras EA. Se demuestra que es un método robusto que consigue los objetivos eficientemente. Además, los controladores obtenidos alcanzan un orden máximo de tres, por lo que su simplicidad es otro factor favorable.

En ambas aproximaciones, se realizan análisis de las respuestas temporales para diferentes velocidades, estados de la mar y ángulos de incidencia de oleaje. Se demuestra que una única ley de control fija alcanza las especificaciones marcadas para las diferentes condiciones de velocidad, oleaje y ángulo de incidencia, y que el sistema diseñado en lazo cerrado consigue el desacoplamiento entre las dinámicas del sistema a la vez que unas respuestas amortiguadas.

En conclusión, se verifica que las técnicas robustas basadas en metodología QFT constituyen una excelente opción para el diseño de control en sistemas multivariables acoplados, y en concreto en la aplicación de un control de estabilización de un sistema marino avanzado, como es un buque de alta velocidad.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad bajo el proyecto DPI2013-46665-C2-2-R.

Referencias

- [1] Andry, A.N., Shapiro, E.Y., Chung, J.C., 1983. Eigenstructure assignment for linear systems. In: IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 19, (5), pp.711-729.
- [2] Borguesani, C., Y. Chait, O. Yaniv.,1995. Quantitative Feedback Theory Toolbox-for use with Matlab. The Mathworks Inc. Natick. M.A
- [3] Chen, W., Balance, D.J., 2001. QFT design for uncertain non-minimum phase and unstable plants visited. Int. Journal of Control, 4(9), 957-965
- [4] Cruz de la, J.M., Ruipérez, P., Aranda, J., 1997. An Eigenstructure Assignment Approach (2). Robust Flight Control, a design challenge, edited by J.F. Magni, S. Bennani and J. Terlouw. LNCIS n. 224. Springer.
- [5] Cruz de la J.M, Aranda, J., Girón-Sierra, J.M., Velasco, F., Esteban, S., Díaz, J.M., de Andrés-Toro, B., 2004, Improving the comfort of a fast ferry, smoothing a ship's vertical motion with the control of flaps and T-foil, IEEE Control System Magazine, 24(2), 47-60.
- [6] Houppis, C. H., S. J. Rassmussen, and M. García-Sanz, 2006. Quantitative Feedback Theory: fundamentals and applications, 2nd Edition, CRC Taylor & Francis: Boca Ralen.
- [7] Horowitz, I.M., Sidi, 1978, Optimus Synthesis of non-minimum phase feedback system with plant uncertainty, Int. Journal of Control, 27, 361-386.
- [8] Horowitz, I.M, 2001. Survey of Quantitative Feedback Theory (QFT), In: Int. Journal of Robust and Non-linear Control, vol. 11, no 10, pp.: 887-921.
- [9] Horowitz, I.M., 2003. Some ideas for QFT research. In: Int. J. Robust Nonlinear Control; 13:599-605.
- [10] Kerr, M., Jayasuriya, S., 2005. An Improved Non-Sequential MIMO QFT Design Method. American Control Conference, 2005. Portland, USA.
- [11] Lloyd, A.R.J.M., 1998. Seakeeping: Ship behaviour in Rough Weather. Ellis Horwood.
- [12] McClure M.A., Paschall, R.N., 1992. Applying Variations of the Quantitative Feedback Technique to Unstable, Non-Minimum Phase aircraft dynamics models. Proc.of the IEEE National Aerospace and Electronic Conference, NAECON, 334-341.
- [13] Muñoz-Mansilla, R., Aranda, J., Díaz, J.M., Cruz, J.M., 2009. A parametric model identification of high-speed craft dynamics. In: Ocean Engineering, 6, pp.1025-1038.
- [14] Sobel, K.M., Shapiro, E.Y., 1985. Eigenstructure Assignment: a tutorial. Proc. American Control Conference, Boston, 456-467
- [15] Wu, S.F., Wei, W. Grimble, M.J, 2004. Robust MIMO control-system design using eigenstructure assignment and QFT. IEE Proc. Control Theory Applications., 151(2), 198-209.
- [16] Xi, H. and Sun, J., 2006. Feedback Stabilization of High-Speed planning Vessels by a controllable Transom Flap. In: IEEE Journal of Oceanic Eng., 31, (2), pp.421-431.
- [17] Yaniv, O., 1999. Quantitative Feedback design of linear and nonlinear control systems, Kluwer Academic Publishers: Norwell, Massachusetts.