



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Desarrollo de una herramienta para el análisis y diseño de sistemas
de control de balanceo de barcos mediante aletas móviles*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Alejandro de Gandarillas Carrara

DIRECTOR: José Antonio González Prieto

CURSO ACADÉMICO: 2021-2022

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Desarrollo de una herramienta para análisis y diseño de sistemas
de control de balanceo de barcos mediante aletas móviles*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El tráfico marítimo es uno de los medios de transporte de mercancías más importante del mundo, siendo la seguridad en la navegación su elemento clave que permite que los barcos cumplan con su misión. La seguridad depende de muchos factores, sistemas y de la tripulación, por eso, durante las últimas décadas la estabilización de balanceo de los barcos se ha convertido en uno de los sistemas básicos que mejora la eficacia del transporte, el confort de los pasajeros y la seguridad de la carga. De esta forma, por medio de un sistema de estabilización adecuado se pueden lograr mejoras en la maniobrabilidad, permitiendo operar en condiciones climáticas adversas a través de la reducción de riesgos asociados a la degradación de la estabilidad.

Este trabajo de fin de grado realiza un estudio de las diferentes medidas empleadas para reducir el balanceo incluyendo tanques de lastre, quillas de balanceo, giroestabilizadoras, aletas estabilizadoras y técnicas de estabilización que emplean el timón. Tras su análisis, se desarrolla el modelo matemático dinámico de balanceo de un barco, para desarrollar una herramienta que permita realizar simulaciones dinámicas de un sistema de control de balanceo de barcos empleando aletas móviles en el entorno de Matlab/Simulink.

PALABRAS CLAVE

Modelo dinámico no lineal, Grados de libertad (DOF), Aleta estabilizadora, Algoritmo de control de balanceo, Simulación.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis compañeros de la promoción 422-152, con los que he tenido la suerte de compartir estos cinco años en la Escuela Naval Militar, donde hemos vivido experiencias inolvidables.

También me gustaría mostrar mi agradecimiento a Jose Antonio, director de este Trabajo de Fin de Grado, por su permanente disposición, entrega e interés que tanto me han ayudado en este trabajo.

Por último, quiero agradecer de forma especial el apoyo y disposición incondicional de mi familia durante los cinco años de formación en la Escuela Naval Militar.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Contexto y motivación	7
1.2 Objetivos	9
1.3 Estructura de la memoria	10
2 Estado del arte	11
2.1 Introducción	11
2.2 Concepto de estabilizador	11
2.2.1 Tipos de estabilizadores.....	13
2.3 Modelado dinámico de embarcaciones	22
2.4 Modelado dinámico del balanceo de un barco (1DOF)	25
2.4.1 Puntos de referencia.....	25
2.4.2 Fuerzas generadas por superficies de control	27
2.4.3 Modelo de un grado de libertad (1DOF)	29
2.4.4 Dinámica de la aleta.....	31
2.5 Modelado dinámico de la trayectoria y balanceo de un barco (4DOF)	32
2.5.1 Fuerzas y momentos hidrodinámicos	33
2.5.2 Fuerzas y momentos generados por las aletas	33
2.5.3 Fuerzas y momentos generados por el timón	34
2.5.4 Fuerzas y momentos generados por la hélice	34
2.6 Modelado de perturbaciones externas: oleaje	34
2.7 Control no lineal adaptativo de balance	35
3 Desarrollo del TFG	39
3.1 Introducción	39
3.2 Medios empleados para el desarrollo del proyecto	39
3.2.1 Matlab	39
3.2.2 Simulink.....	40
3.2.3 App.Designer	40
3.3 Desarrollo del modelo con un grado de libertad (1DOF)	40
3.3.1 Modelo de aprendizaje.....	40
3.3.2 Modelo teórico.....	44

3.4 Desarrollo del modelo con cuatro grados de libertad (4DOF).....	51
3.4.1 Subsistema: Roll ship dynamics	55
3.4.2 Subsistema: Control.....	60
3.4.3 Subsistema: Parameters	60
4 Prueba y análisis de resultados	63
4.1 Introducción	63
4.2 Análisis del modelo de un grado de libertad (1DOF)	63
4.2.1 Parámetros iniciales	64
4.2.2 Análisis para distintos tamaños de aleta	67
4.2.3 Análisis para distintos ángulos de encuentro con la ola	68
4.2.4 Análisis para distinta altura de ola.....	70
4.2.5 Análisis para distinto tipo de barco	71
4.2.6 Conclusión del análisis del modelo de un grado de libertad	73
5 Conclusiones y líneas futuras	75
5.1 Revisión de los objetivos	75
5.2 Líneas futuras	76
6 Bibliografía.....	77
Anexo I: Gráfico corte transversal 1DOF	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Partes básicas de un barco [Elaboración propia]	12
Figura 2-2 Movimiento de balanceo [5]	13
Figura 2-3 Movimiento de cabezada [5]	13
Figura 2-4 Distribución de pesos [Elaboración propia]	14
Figura 2-5 Vela ligera [7]	14
Figura 2-6 Tanques de lastre [Elaboración propia]	15
Figura 2-7 Tanques de lastre en forma de U [8]	16
Figura 2-8 Quilla corrida [5]	17
Figura 2-9 Quilla de aleta [5]	17
Figura 2-10 Quilla de aleta con bulbo [5]	18
Figura 2-11 Quilla de aleta con alas [5]	18
Figura 2-12 Quilla doble [5]	19
Figura 2-13 Giroestabilizador de doble rueda [8]	20
Figura 2-14 Aleta estabilizadora [9]	21
Figura 2-15 Controlador de balanceo (rápido) y controlador de guiñado (lento) [10]	21
Figura 2-16 Representación de los 6 grados de libertad [12]	24
Figura 2-17 Flotación [13]	26
Figura 2-18 Obra viva y obra muerta [13]	26
Figura 2-19 Metacentro transversal [13]	27
Figura 2-20 Metacentro longitudinal [13]	27
Figura 2-21 Modelado hidrodinámico de la aleta [Elaboración propia]	28
Figura 2-22 Vista lateral de la embarcación [Elaboración propia]	28
Figura 2-23 Vista trasera de la embarcación [Elaboración propia]	29
Figura 2-24 Relación entre coeficiente de sustentación y el ángulo de la aleta [16]	31
Figura 2-25 Representación gráfica 4DOF [Elaboración propia]	33
Figura 3-1 Modelo de un grado de libertad [Elaboración propia]	41
Figura 3-2 Parámetros del modelo de Yang Yiang [Elaboración propia]	42
Figura 3-3 Dinámica del modelo de balanceo Yang Jiang [Elaboración propia]	42
Figura 3-4 Resultados gráficos del modelo Yang Jiang [Elaboración propia]	43
Figura 3-5 Dinámica genérica de un barco de Isah Abdulasheed [Elaboración propia]	46
Figura 3-6 Momento de control generado por el estabilizador [Elaboración propia]	46
Figura 3-7 Parámetro b [Elaboración propia]	47
Figura 3-8 Dinámica de balanceo del buque (F) [Elaboración propia]	47

Figura 3-9 Parámetro A3 [Elaboración propia].....	48
Figura 3-10 Modelo de análisis de rendimiento de aletas estabilizadoras para 1DOF [Elaboración propia]	49
Figura 3-11 Perturbación genérica 1DOF [Elaboración propia]	51
Figura 3-12 Modelo de perturbación generada por las olas [Elaboración propia]	51
Figura 3-13 Sistema de control 1DOF [Elaboración propia]	51
Figura 3-14 Modelo de simulación de un barco con sistema de control en 4DOF [Elaboración propia]	54
Figura 3-15 Dinámica de un barco definida por Zhang Songtao [Elaboración propia]	55
Figura 3-16 Fuerzas y momentos 4DOF [Elaboración propia]	56
Figura 3-17 Fuerzas y momentos de la aleta [Elaboración propia].....	57
Figura 3-18 Fuerzas y momentos hidrodinámicos [Elaboración propia]	57
Figura 3-19 Fuerzas y momentos hidrodinámicos en X [Elaboración propia]	57
Figura 3-20 Fuerzas y momentos del timón [Elaboración propia].....	58
Figura 3-21 Fuerzas y momentos de la hélice en X [Elaboración propia]	58
Figura 3-22 Aceleraciones 4DOF [Elaboración propia]	59
Figura 3-23 Aceleración en X [Elaboración propia]	59
Figura 3-24 Sistema de control 4DOF [Elaboración propia]	60
Figura 3-25 Parámetros 4DOF [Elaboración propia]	60
Figura 3-26 Parámetros de la aleta 4DOF [Elaboración propia].....	61
Figura 4-1 Corte transversal (Caso 1) [Elaboración propia]	65
Figura 4-2 Funciones de balanceo (Caso 1) [Elaboración propia]	66
Figura 4-3 Funciones de balanceo (Caso 2) [Elaboración propia]	67
Figura 4-4 Funciones de balanceo (Caso 3) [Elaboración propia]	68
Figura 4-5 Funciones de balanceo (Caso 4) [Elaboración propia]	69
Figura 4-6 Funciones de balanceo (Caso 5) [Elaboración propia]	70
Figura 4-7 Funciones de balanceo (Caso 6) [Elaboración propia]	71
Figura 4-8 Funciones de balanceo (Caso 7) [Elaboración propia]	72
Figura 4-9 Funciones de balanceo (Caso 8) [Elaboración propia]	73
Figura 4-10 Tendencia del ángulo de aleta [Elaboración propia]	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Nomenclatura empleada en la descripción del movimiento del buque.....	23
Tabla 2-2 Estado experimental de la aleta [16]	30
Tabla 2-3 Modelo 4DOF [19]	32
Tabla 3-1 Parámetros del modelo Isah Abdulrasheed Jimoh	45
Tabla 3-2 Nomenclatura del modelo Isah Abdulrasheed Jimoh	45
Tabla 3-3 Parámetros del barco [19]	52
Tabla 3-4 Parámetros de la aleta y del timón [19].....	52
Tabla 3-5 Coeficientes hidrodinámicos [19]	53
Tabla 3-6 Esquema numérico implementado en Simulink.....	55
Tabla 4-1 Parámetros del barco del modelo Ronghui Li [30]	64
Tabla 4-2 Parámetros iniciales (Caso 1).....	64
Tabla 4-3 Parámetros para simulación con cambio de tamaño de aleta.....	67
Tabla 4-4 Parámetros para simulación con cambio de ángulo de encuentro	69
Tabla 4-5 Parámetros para simulación con cambio de altura de ola	71
Tabla 4-6 Parámetros para simulación con cambio de barco	72
Tabla 4-7 Tendencia del ángulo de aleta.....	74

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto y motivación

Debido a una serie de ideas tecnológicas, económicas y socioculturales, raramente un país puede mantenerse totalmente aislado de las actividades económicas de otros países. De hecho, muchos países han experimentado un crecimiento económico asombroso en el pasado reciente debido a abrir sus fronteras y mercados a la inversión y al comercio extranjero. Este mayor flujo de conocimiento, recursos, bienes y servicios entre las naciones de nuestro mundo se denomina globalización, formalmente definida como el desarrollo de una economía mundial cada vez más integrada, caracterizada especialmente por el libre comercio, la libre circulación de capitales y el aprovechamiento de los mercados laborales extranjeros más baratos. Es por eso por lo que el transporte marítimo ha sido una actividad humana importante a lo largo de la historia, especialmente cuando la prosperidad dependía principalmente del comercio internacional e interregional. De hecho, el transporte ha sido calificado como una de las cuatro piedras angulares de la globalización, junto con las comunicaciones, la estandarización internacional y la liberación del comercio [1].

La globalización de la historia marítima, sin embargo, tiene un carácter de naturaleza muy específico; teniendo sus raíces en la tecnología. A lo largo de los tiempos, el comercio marítimo ha sido más barato que el transporte por tierra gracias a la capacidad que tienen los barcos, lo cual permitió que el transporte de mercancías en mayores distancias fuera posible y que se pudieran manejar cargas más pesadas si se realizaba por ríos, lagos u océanos. La diferencia era sólo relativa y no implicaba que el desarrollo de las rutas comerciales por tierra no hubiese desempeñado ningún papel en la expansión de las redes mercantiles mundiales. No obstante, sigue siendo cierto que el comercio marítimo ha sido el principal agente de expansión geográfica y de creación de verdaderas redes comerciales de larga distancia y, por tanto, culturales y lingüísticas. Incluso hoy, a pesar de las nuevas redes comerciales existentes, el comercio a larga distancia de gran escala depende, con pocas excepciones, del transporte marítimo.

En un contexto como el actual, en el que el tráfico marítimo se incrementa de manera continuada, a la vez que se incrementa el tamaño de los grandes buques que transportan grandes cantidades de mercancía, **la seguridad en el tráfico marítimo** es un elemento clave. Tanto en lo que respecta a la protección de la tripulación, como en lo referente a una mejora en la eficiencia económica derivada en una mejora en la protección de la carga transportada y del menor consumo de combustible que se logra con una mayor eficiencia en las rutas trazadas. Debido a esto los grandes armadores optan por la búsqueda de soluciones tecnológicas que garanticen la seguridad en los buques y la eficiencia económica en la actividad [2].

Sorprende la diversidad de actividades que se realizan en un barco en el día a día, tanto por su cantidad como por su variedad. La navegación, el mantenimiento, las acciones y ejercicios de seguridad, los trabajos relacionados con la carga y descarga, comunicaciones, controles varios, el propio ocio de la dotación o incluso su descaso son tareas que la tripulación debe dominar a la perfección. Para poder llevar a cabo todas estas actividades es fundamental que el entorno en el que se encuentre la dotación sea cómodo, de tal forma que permita realizar todas estas actividades de una forma segura.

Sin embargo, y a pesar de los sofisticados equipos de gran ayuda a la navegación como la detección de otros buques y otros elementos extraños en la trayectoria del barco, a lo largo de los años se han producido una importante cantidad de accidentes por colisión entre grandes buques debido a diferentes fallos en los sistemas del buque, entre los que destacan: dificultad de maniobrabilidad durante su navegación y la falta de estabilidad, lo cuales pueden producir un descontrol de la plataforma que ocasione la pérdida de vidas humanas, de mercancías o daños medioambientales. En muchos casos estos accidentes podrían ser evitados o al menos minimizado su impacto si los buques hubiesen tenido unas mejores condiciones de maniobrabilidad que permitiesen gobernarlos de manera segura.

En consecuencia, el correcto diseño de los buques debe tener en cuenta que se van a ver obligados a navegar a lo largo de su vida útil en diferentes condiciones de carga y con diferentes condiciones medioambientales. Unas veces navegarán a plena carga, otras con carga parcial y, en otras situaciones sin carga. Por esta razón es necesario compensar la diferencia del peso y desequilibrio, para no comprometer la estabilidad del buque. En vista de esto es por lo que la arquitectura naval ha reconocido desde los primeros tiempos la importancia de la estabilidad entendiendo que los buques tienen que adaptarse a un medio inestable como es la mar. Los problemas de estabilidad de los buques conciernen a un amplio círculo de profesionales relacionados con el diseño, producción y operación. De forma que proveer a un buque de estabilidad suficiente sigue siendo un reto, debido a dos razones fundamentales:

- En primer lugar, el diseño de los buques se encuentra en constante evolución como consecuencia de los cambios constantes en los requerimientos de mercado, es decir, están en un periodo de adaptación constante. Esto hace que las experiencias anteriores queden parcialmente obsoletas, y a menudo sean aplicables de manera condicional. Los nuevos barcos tienen dimensiones y geometrías de casco diferentes en comparación con el pasado y muy probablemente con el futuro. Por otra parte, debemos tener en cuenta los modos de operación los cuales están en un cambio constante con el incremento del tráfico marítimo.
- En segundo lugar, la demanda de la industria para el establecimiento de reglas basadas en el riesgo y regulaciones apropiadas se ha visto incrementado en los últimos años. Amplios grupos de profesionales involucrados en todos los aspectos del negocio marítimo son conscientes de que existe un riesgo intrínsecamente asociado al viaje marítimo y querrían entender la dimensión de este riesgo y como controlarlo o minimizarlo de la manera más eficaz posible.

La cantidad de conocimiento relativo a la estabilidad de los buques es actualmente enorme, su estudio es una materia de gran complejidad que debe considerar distintas vertientes como puede ser el diseño del barco, su misión como los aspectos regulatorios a nivel nacional e internacional. Además, debemos tener en cuenta numerosos factores que tienen influencia directa sobre la propia estabilidad del buque como los efectos de la carga, las olas, el viento o la densidad del agua. Tras el estudio de la estabilidad, el mayor riesgo que definen los expertos es el vuelco, por las desastrosas consecuencias tanto a nivel de seguridad de las personas como las consecuencias económicas. Si bien existen numerosos conocimientos sobre la estabilidad, el riesgo del vuelco y el impacto físico influyen en diferentes situaciones haciendo el estudio de la estabilidad enormemente complejo [3].

El objetivo final en la definición de los parámetros de la estabilidad de un buque es el de confirmar que su operación es segura sin que ocurran incidentes que puedan terminar en la pérdida de estabilidad y en consecuencia en la falta de control de buque o en el vuelco. Los fallos en un sistema tan complejo

como es un buque pueden ocurrir en el sistema en su totalidad o en algunos de sus elementos, algo frecuente en la vida a bordo de un buque. Fallos como el vuelco, colisión con el fondo marítimo o pérdida en la resistencia longitudinal supondrá una pérdida total, casi con total seguridad, del buque. Por el contrario, daños producidos en la hélice, sistema de propulsión o en cualquier parte del buque debido a factores externos al buque como internos, no suponen la pérdida inmediata del buque, pero pueden suponer una serie de fatalidades en cadena que finalmente concluyan con la pérdida total del buque.

Asimismo, y como alumno de la escuela naval militar, futuro oficial de la Armada, soy consciente de la importancia que tiene la seguridad en la navegación, empezando por la completa y exigente formación que debe tener un marino de guerra, de la misma forma que hablo de un marino de guerra lo considero de cualquier persona que se haga a la mar, sabiendo que es un medio diferente, muchas veces desconocido y en el que la capacidad de reacción a situaciones adversas es determinante. Es por eso, por lo que un hombre de mar debe estar completamente capacitado para poder llevar a cabo una navegación segura a pesar de las difíciles situaciones a las que tenga que hacer frente.

Para ello, es de vital importancia, tener una preparación adecuada, basada en los estudios y llevada a la práctica, antes de salir a la mar, en los simuladores de navegación, herramienta fundamental en el adiestramiento de un marino.

Los simuladores de navegación deben simular, de la manera más precisa, cualquier situación a la que tuviese que enfrentarse un marino en la mar. Por eso, el Centro Universitario de la Defensa ha iniciado un proyecto denominado TraBoDit (Training Boat Digital Twin), el cual plantea como objetivo principal la creación y validación de modelos matemáticos que permitan crear gemelos digitales. Se trata, por tanto, de estimar con robustez el **comportamiento dinámico de las embarcaciones** de forma que se valide el comportamiento del gemelo digital con un cierto nivel de precisión. Dicho modelo estará finalmente condicionado por las características impuestas por el simulador, es decir, el objetivo final es crear un modelo matemático que sea directamente aplicable a las condiciones del simulador.

TraBoDit desglosa su trabajo en varios objetivos, siendo uno de ellos la motivación principal para el desarrollo de este proyecto, ya que su desarrollo requiere del conocimiento de los modelos matemáticos empleados para crear versiones virtuales del comportamiento dinámico de las lanchas de instrucción. Dentro de este proceso de adquisición del conocimiento sobre las dinámicas de los barcos y el estudio de su maniobrabilidad, se ha planteado este TFG como un medio para incrementar el conocimiento del equipo de investigación sobre los procesos de identificación de modelos asociados a las dinámicas de barcos, así como conseguir una primera versión de una herramienta de simulación que permita el estudio de los mecanismos de control de estabilidad del movimiento lateral (el denominado ángulo de *roll*) de varios tipos de barcos en diferentes tipos de condiciones ambientales mediante el uso de aletas estabilizadoras.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el establecido en el título mismo, es decir: Desarrollar una herramienta para el análisis y diseño de sistemas de control de balanceo de barcos mediante aletas móviles. Más concretamente, se trata de emplear el entorno Matlab/Simulink, para diseñar una herramienta que permita realizar simulaciones dinámicas de un sistema de control de balanceo de barcos empleando aletas móviles, para lo cual se proponen los siguientes objetivos más específicos:

- Estudio del estado del arte de los diferentes métodos empleados como sistemas de control de balanceo en los barcos a lo largo de la historia.
- Estudio y análisis de los modelos matemáticos que desarrollan la dinámica de balanceo de un barco.

- Estudio e implementación de un algoritmo de control.
- Implementación de los modelos que desarrollan la dinámica de balanceo en Simulink.
- Análisis de la simulación y validación de resultados.

1.3 Estructura de la memoria

Una vez contextualizado el trabajo, y habiendo establecido los objetivos, se describe a continuación la estructura de la memoria con la finalidad de disponer de una visión más clara. La memoria se distribuye en cinco capítulos, bibliografía y un anexo.

- Capítulo 1: Introducción y objetivos. En este capítulo se introduce al lector al contexto bajo el cual se desarrolla este trabajo, razonando los factores que motivan este proyecto. Además, se establecen los objetivos del mismo.
- Capítulo 2: Estado del arte. En este segundo capítulo se introduce una serie de conceptos teóricos necesarios para facilitar la comprensión del trabajo. Asimismo, se realiza una revisión del estado del arte de los diferentes sistemas de estabilización, más concretamente consiste en lo siguiente:
 - En primer lugar, se desarrolla una introducción al entorno marítimo, definiendo los términos específicos que se emplean en este ámbito.
 - En segundo lugar, se describen los tipos de sistemas de control de estabilización que permiten degradar o eliminar el nivel de balanceo que experimenta un barco.
 - En tercer lugar, se realiza un estudio de los modelos matemáticos que definen la dinámica de balanceo de un barco.
 - En cuarto lugar, se describe el algoritmo de control de balanceo.
- Capítulo 3: Desarrollo del TFG. En este capítulo se exponen los recursos empleados para el diseño de una herramienta que implemente los modelos de la dinámica de balanceo, con la finalidad de realizar simulaciones dinámicas.
- Capítulo 4: Prueba y análisis de resultados. En este capítulo se realizan una serie de simulaciones en función de diferentes parámetros, las cuales permiten analizar el funcionamiento de las aletas estabilizadoras como sistema de control de balanceo y del escenario de simulación generado.
- Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras. En este capítulo se desarrollan las conclusiones del trabajo y se presentan las posibles líneas futuras de investigación para continuar con la línea general del proyecto.
- Finalmente, se adjuntan las referencias bibliográficas y sitios web consultados, así como el anexo que apoya el desarrollo del trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

El entorno marino es un ambiente completamente diferente al mundo donde vivimos, el cual emplea una jerga distinta a nuestro lenguaje. Es por eso por lo que este capítulo trata de introducir a lector en este mundo, definiendo los conceptos básicos que se emplean en el entorno marítimo. Asimismo, trata de explicar los movimientos principales que experimenta un barco, incluyendo los diferentes sistemas de estabilización que se han desarrollado a lo largo de la historia. Además, trata de estudiar los modelos que definen la dinámica de balanceo de un barco, siendo estos lo que se emplearán para el desarrollo del programa.

2.2 Concepto de estabilizador

Durante las últimas décadas, la estabilización del balanceo de los buques se ha utilizado cada vez más en áreas tales como operaciones de carga y descarga, la eficacia energética y la comodidad de los pasajeros. Entre las medidas de reducción de balanceo existen diferentes métodos que ayudan a eliminar o disminuir la posición de inestabilidad de una plataforma, entre las que destacan las quillas de pantoque, tanques de lastre, estabilización del balanceo del timón y los estabilizadores de aleta. De esta forma, mediante un sistema adecuado de estabilización del balanceo, se puede conseguir un buen comportamiento de los barcos en el mar, incluso en situaciones con condiciones meteorológicas adversas. El mar es un medio muy inestable en el que hay muchos factores que afectan a la estabilidad de un barco, siendo dos de sus características las que permiten definir su posición de equilibrio, estas son el balanceo (roll) y la cabezada (pitch). Para entender en profundidad en que consiste el control de balanceo se definen una serie de conceptos.

Para definir el término de barco o buque, se explicará su origen etimológico. Esta palabra deriva del latín de la palabra “barca” que se utilizaba como sinónimo de “bote”, a su vez, esta procedía del griego del término “baris”, que se utilizaba con el significado de “canoa”. Entonces se define buque como vehículo flotante que ha de reunir una serie de cualidades para navegar, derivadas del ámbito en que se desenvuelve y de su condición móvil. Las cualidades esenciales son: *solidez, estanqueidad, flotabilidad, estabilidad, velocidad, facilidad de gobierno*, es decir, que obedezca rápidamente a la acción del timón y *los medios para manipulación y buena estiba de la carga* con rapidez y sencillez de maniobra [4]. El buque tendrá cada una de las cualidades citadas en mayor o menor grado de acuerdo con la función para la que ha sido diseñado.

- **La solidez** exige una estructura de casco robusta para resistir los esfuerzos al que el buque se ve sometido durante su vida por la acción de los diferentes estados del mar y de los pesos

que transporta; esta cualidad incide notablemente en el peso total del buque, razón suficiente para el desarrollo y avance de las técnicas y materiales de construcción naval.

- **La estanqueidad** evita que entre agua al interior del buque de cualquier circunstancia de tiempo meteorológico y lugar.
- **La flotabilidad** permite al buque mantenerse a flote a pesar de que algunas de sus partes se encuentren inundadas; a esta cualidad le favorece una buena división estanca en el interior de la plataforma, así como una obra muerta elevada.
- **La estabilidad** da lugar a que vuelva a su posición de equilibrio por sí mismo, cuando ha sido desplazado de ella por un agente externo; influyen en la estabilidad los pesos y la forma del buque.
- La velocidad es función de las formas del buque y de la propulsión que posee.
- La facilidad de gobierno es una característica que se requiere debido a la necesidad de movimiento del buque en todas las direcciones; es función de las formas y del reparto de pesos en el sentido longitudinal en lo referente a estructura.
- Los medios de para la manipulación y buena estiba de la carga contribuyen esencialmente a la buena explotación económica del buque.

Desde el punto de vista general, el buque tiene un conjunto de partes con términos específicos, tales como: *casco*, *proa*, *popa*, *babor*, *estribor*, *obra viva* y *obra muerta*.

- **El casco** es el cuerpo del buque en rosca, es decir sin contar con su arboladura, máquinas ni pertrechos.
- **La proa** es la parte delantera del buque que va cortando las aguas del mar, por extensión y sentido relativo, se denomina también proa al tercio anterior del buque. Por el contrario, **la popa** se define como la terminación posterior de la estructura del buque. Al igual que en el caso anterior, también se llama popa a la parte trasera de un buque.
- Supuesto a un observador a popa en la crujía (plano central longitudinal) del buque, y mirando hacia proa, todas las partes del buque situadas a la izquierda se consideran **banda de babor** y todas las partes situadas a la derecha se consideran **banda de estribor**. Se puede ver reflejado en la Figura 2-1.
- **La obra viva** o carena es la parte del casco de un buque sumergido en el agua, el límite superior de la obra viva viene señalado por la línea de flotación, que es la línea marcada en el casco por la superficie del agua del mar. En contraste, se llama **obra muerta** a la parte del casco comprendida entre la línea de flotación hasta la borda.

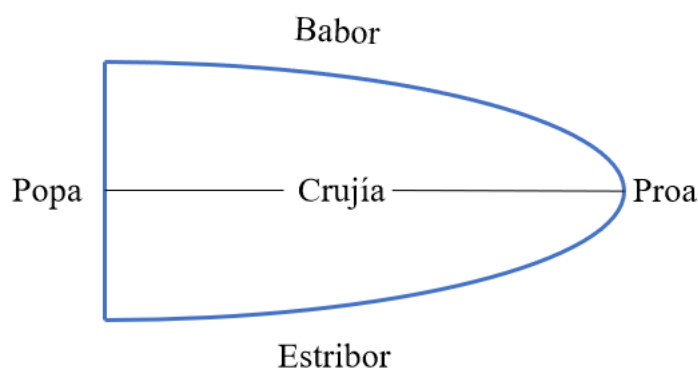


Figura 2-1 Partes básicas de un barco [Elaboración propia]

Como se ve al inicio de este apartado, los dos factores fundamentales que definen los movimientos de inestabilidad son el balanceo y cabezada. Entonces, se define **el balanceo** como el movimiento transversal con respecto al eje longitudinal de la embarcación, alternativamente a estribor y a babor. Este movimiento se produce debido a las condiciones de mar y viento o por el desplazamiento de cargas que modifican la distribución de pesos del barco. En la Figura 2-2 se observa este movimiento gráficamente.

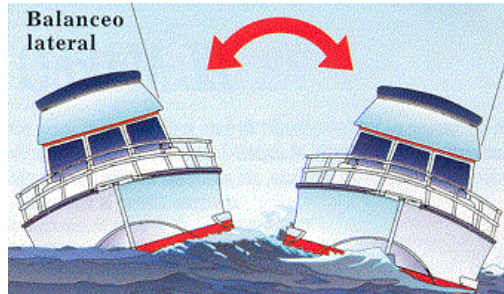


Figura 2-2 Movimiento de balanceo [5]

La cabezada, es el movimiento longitudinal de proa (parte delantera del barco) a popa (parte trasera del barco) por el que el barco se inclina alternativamente en torno a su centro de flotación. Este movimiento se produce debido a las condiciones de mar y viento que afecten al barco. Se adjunta Figura 2-3 donde se observa el movimiento de forma más clara.



Figura 2-3 Movimiento de cabezada [5]

2.2.1 Tipos de estabilizadores

En este apartado se explican los diferentes tipos de control de estabilización que permite eliminar o disminuir los movimientos de balanceo y cabezada definidos en el apartado anterior. En primer lugar, se definen, de manera genérica, dos tipos de estabilizadores:

- **Estabilizadores activos**, se caracterizan por la necesidad de entrada de energía al sistema a través de distintos mecanismos como puede ser una bomba o un pistón hidráulicos. Este tipo de estabilizador funciona de manera automática, es decir, corrigiendo el movimiento de la plataforma tanto en balanceo como en cabezada. Son los sistemas más efectivos, pero su principal desventaja es que presentan un alto coste y mantenimiento. Además, pueden ser retráctiles o estar en una posición fija, dependiendo del método de construcción.
- **Estabilizadores pasivos**, a diferencia de los sistemas activos, estos no necesitan energía de entrada. Esto se debe a que estos sistemas no son móviles, es decir, no corrigen la estabilidad de la plataforma de manera automática. Estos sistemas son menos efectivos que los estabilizadores activos, pero presentan un bajo coste y un mantenimiento mínimo.

A continuación, se introducen los diferentes sistemas de control de balanceo que se utilizan en la actualidad, estudiando la energía que consumen, dificultad de instalación y mantenimiento, capacidad de control de balanceo y por último se pondrán algunos ejemplos de su utilización en la actualidad.

2.2.1.1 Distribución de pesos

La distribución de pesos se encuadra dentro de los estabilizadores pasivos, es la manera más rudimentaria, y la forma más lógica de estabilizar un barco antes de salir a la mar distribuyendo pesos a lo largo de las cubiertas del barco [6]. Este método es originario de la época romana, pero en ocasiones se sigue empleando hoy en día. Se basa en la estiba de cargas en las cubiertas superiores buscando la mayor estabilidad del buque como se muestra en la Figura 2-4. De esta forma, el peso de la carga se aplica como una fuerza que funciona de contrapeso. Esta fuerza contrarresta los movimientos de balanceo que puedan producir los puntos fuertes.

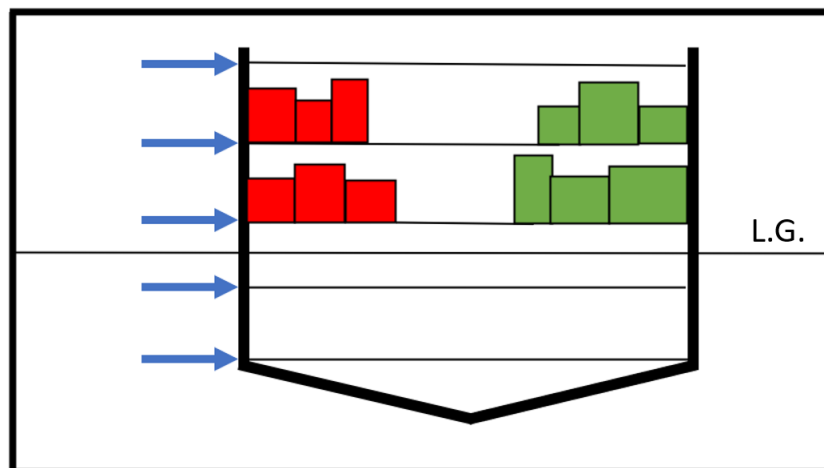


Figura 2-4 Distribución de pesos [Elaboración propia]

La ventaja principal de este sistema es que permite generar una estabilidad desde el inicio de la navegación y no necesita añadir ningún mecanismo. Este método de control no consume energía, ni necesita ningún tipo de mantenimiento ya que no utiliza ningún mecanismo que lo precise. Como se estableció anteriormente consiste en estabilizar la embarcación antes de salir a la mar, colocando cargas de manera que la plataforma sea estable.

La principal desventaja es que este método no corrige los movimientos de balanceo de manera automática, es decir, en caso de que se desestabilice el barco se quedará escorado hasta que la dotación mueva la carga para producir estas fuerzas que funcionarían como contrapesos. El control de balanceo de este sistema es poco efectivo ya que la mar es un medio muy variable y hay muchos parámetros que van a producir inestabilidad abordo como el oleaje, el viento y cambios de rumbo.

Hoy en día es un método utilizado por barcos de regatas. Se trata de barcos de vela ligera, como pueden ser la clase óptimis, snipes o veleros de mayor envergadura como cruceros.



Figura 2-5 Vela ligera [7]

Como se observa en la Figura 2-5, el regatista tiene que producir un contrapeso con su propio cuerpo para apoyar todo el casco en el agua y de esta manera obtener una mayor velocidad durante la regata. La navegación a vela produce escora debido al fuerte empuje del viento sobre la vela, es por eso por lo que este sistema de estabilización se sigue empleando en este deporte. Este tipo de barcos son muy sencillos, y no disponen de ningún contrapeso que contrarreste el movimiento de balanceo, tienen que ser los propios patrones los que se encarguen de mantener la estabilidad de forma activa.

2.2.1.2 Tanques de lastre

Los tanques de lastre son un método similar al empleado en la distribución de pesos, aunque la diferencia es que emplea el agua que se encuentra en los tanques del interior del casco como contrapeso del movimiento de balanceo, representado en la Figura 2-6. Una consecuencia del empleo del agua es que reduce las propiedades de estabilidad del buque debido a que las superficies líquidas son libres al moverse. Este tipo de control de estabilidad permite reducir el balanceo, aunque no llega a eliminarlo por completo [6].

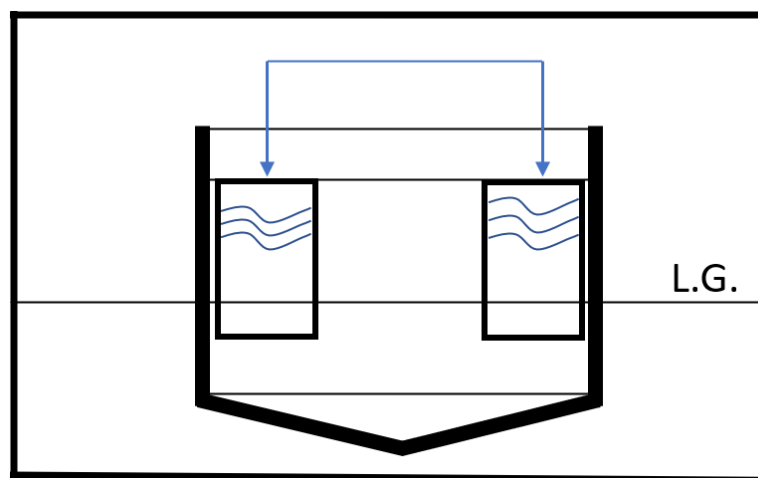


Figura 2-6 Tanques de lastre [Elaboración propia]

En 1961, en el trabajo de Vasta et al. se resume el desarrollo temprano de los estabilizadores en la Armada de Estados Unidos. En él informa del uso de tanques en diferentes buques, y proporciona un modelo matemático de un tanque en U basado en los desarrollos realizados en la universidad de Stanford a principios de la década de los 50. Hasta la fecha, el control de balanceo se realizaba controlando la presión del aire en la parte superior de los depósitos a través de una válvula, como se aprecia en la Figura 2-7. A finales del siglo XX, en Inglaterra, un comité presentó un estudio sobre la estabilidad del HMS Inflexible (crucero de combate de la clase Invencible de la Royal Navy) en el que se establecía que la libre circulación del agua dentro de los compartimentos dañados contribuía a un aumento de la capacidad de adrizamiento. Esto solo ocurría si el número de compartimentos inundados era bajo y el nivel de agua era adecuado. Este estudio junto con el trabajo de Froude fue probablemente el primer intento de emplear tanques contra rebotes pasivos.

A la línea de investigación en la búsqueda de estabilidad a través de tanques de lastre, se unió el trabajo Frahm, en el que se desarrolla la idea de construir tanques en forma de U, mostrada en la Figura 2-7. Este tipo de tanque resultó ser más eficaz que el tanque de superficie libre, utilizado por Froude y Watt, mostrado en la Figura 2-6. El tanque en U consiste en dos depósitos situados uno a estribor y el otro a babor, de manera simétrica y comunicados a través de un conducto que permite su flujo de un depósito a otro. Los tanques están dimensionados de tal forma que la frecuencia natural del tanque coincida con la frecuencia natural del balanceo. Esto solo puede lograrse con una sola frecuencia, por lo tanto, si la plataforma se aparta de la frecuencia natural, el rendimiento se degradará, lo cual limita mucho sus capacidades para ser empleado en diferentes situaciones. Esto se podría evitar mediante un

control activo. El estudio de los tanques contra rebotes activos se iniciaría 20 años más tarde, cuando Minorsky (1935) empleará una bomba para alterar el movimiento natural de los tanques, de forma que la velocidad del fluido variaba en función de la aceleración del balanceo.

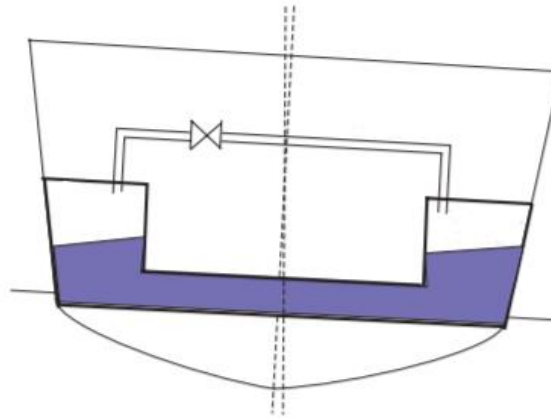


Figura 2-7 Tanques de lastre en forma de U [8]

En la actualidad este sistema ha evolucionado, siendo uno de los principales sistemas de corrección de escora, funcionando con bombas de trasiego que distribuyen el agua de un tanque a otro rápidamente. Utilizan un sensor (inclinómetro) el cual indica la escora del buque y este envía una señal a una unidad computarizada para que actúe sobre las bombas de trasiego. Este medio de control de estabilidad se encuentra en veleros como el Juan Sebastián de Elcano, el cual emplean el sistema de trasiego de tanques para corregir la escora producida por la navegación a vela. En este barco, el sistema funciona de manera manual y son los propios operarios quienes se encarga de activar las bombas de trasiego cuando el barco tiene una inclinación determinada.

2.2.1.3 Quillas de balanceo

La quilla de un barco es un elemento estabilizador. En esencia, la quilla de un velero tiene la función de compensar la acción que hace el viento sobre las velas, impidiendo el abatimiento y haciendo que el barco se mantenga a rumbo. Existen diferentes tipos de quillas, la cuales se explican a continuación:

- **Quilla corrida.** Como se muestra en la Figura 2-8 son parte integral del barco, lo recorren de proa a popa a lo largo de la línea de flotación. Este tipo de quilla ofrece un menor balanceo y escora producidos por la acción de viento y las olas, lo suelen utilizar barcos que naveguen en alta mar. Ofrecen estabilidad direccional y permite que la navegación sea cómoda a pesar de las condiciones adversas. Además, proporciona una mayor robustez debido a que la quilla recorre todo el casco, resguardando el timón y la hélice frente a una posible colisión. Por el contrario, este tipo de quilla, al ser de mayor envergadura, aumenta el desplazamiento del barco por lo que proporciona mayor resistencia al avance y en consecuencia disminuye su velocidad. Como se estableció anteriormente aumenta el desplazamiento de la plataforma dificultando su maniobrabilidad en espacios reducidos, debido a que su radio de giro es mayor.



Figura 2-8 Quilla corrida [5]

- Quilla de aleta. Es un elemento plano, estrecho e hidrodinámico situado en la parte inferior del casco. La diferencia principal con la quilla corrida, además de su tamaño, es que no forma parte del casco, sino que va a tornillada a él, siendo más profunda para compensar el lastre (Figura 2-9). Se caracteriza por tener unas propiedades hidrodinámicas muy altas, al tener una obra viva (superficie sumergida de un buque) menor, se reduce su desplazamiento y la fuerza de arrastre, proporcionando una mayor velocidad. Además, el desplazamiento va directamente relacionado con el radio de giro de la plataforma, siendo más corto y ofreciendo una mayor maniobrabilidad. Por el contrario, este tipo de quilla es menos robusta y ofrece una serie de deficiencias en la unión al casco, ya que no es parte integral del mismo. También ofrece menos resistencia lateral, derivando en una mayor escora para ráfagas de viento fuerte. Por último, al ser una quilla de menor tamaño no resguarda al timón y a la hélice como la quilla corrida, siendo más vulnerable a golpes y colisiones.



Figura 2-9 Quilla de aleta [5]

- Quilla corrida. Proporcionan más lastre sin aumentar la profundidad como se muestra en la Figura 2-10. Además, permite navegar por agua poco profundas manteniendo la estabilidad del barco. Este tipo de quilla proporciona ventajas y desventajas similares a las quillas de aleta frente a las quillas corridas.



Figura 2-10 Quilla de aleta con bulbo [5]

- Quilla de aleta con alas. En la Figura 2-11 se muestra este tipo de quilla, donde las alas en la quilla proporcionan estabilidad hidrodinámica adicional. De la misma forma que las quillas de aleta con bulbo, este tipo de quillas ofrece características similares a las quillas de aleta mejorando su estabilidad hidrodinámica.



Figura 2-11 Quilla de aleta con alas [5]

- Quilla doble o de pantoque. Son quillas de poco calado instaladas en los costados del casco, representado en la Figura 2-12. Este tipo de quillas es muy utilizado en Reino Unido donde los barcos tienen que varar con mareas bajas. Este tipo de quilla ofrece un soporte de calidad a la hora de varar, además de una mayor facilidad a la hora de ser transportados. Por el contrario, tienen un bajo rendimiento, baja resistencia a la deriva cuando escora y la fuerza adrizante (capacidad que tiene el barco para estabilizarse y obtener un mayor rendimiento durante su navegación) que proporciona al barco es menor.



Figura 2-12 Quilla doble [5]

En conclusión, todos estos tipos de quillas ofrecen a la plataforma un menor movimiento de balanceo y cabezada producidos por la acción del viento, el mar y cambios de rumbo. Son fáciles de instalar y todos los buques precisan de una quilla independientemente de su desplazamiento. No consumen energía ya que son fijos, es decir, no se mueven durante su navegación. Más concretamente las quillas de balanceo son sistemas de control de estabilización que se encuadran dentro del grupo de estabilizadores pasivos. Como se estableció en el apartado 2.2.1, estos tipos de estabilizadores no necesitan mantenimiento y son estabilizadores de bajo coste.

2.2.1.4 Giroestabilizadores

El uso de fuerzas giroscópicas se propuso entonces como método para estabilizar y eliminar el balanceo en vez de reducirlo, lo cual es la principal diferencia respecto con los métodos anteriores. Un giroestabilizador consiste en una o más ruedas giratorias específicas cuyos efectos giroscópicos se utilizan para contrarrestar las fuerzas de excitación del balanceo. El trasatlántico “Conte di Savoia”, de origen italiano, fue el pionero uno de los buques pioneros en emplear este método como estabilizador. El trasatlántico italiano contaba con tres giróscopos de grandes dimensiones situados a popa. La fuerza de inercia generaba una fuerza de oposición a los balances del buque a través de sus volantes de giro. A medida que aumentase el momento angular, mayor sería la fuerza de inercia.

Otro de los primeros en estudiar este método fue Schlick, quien fue el primero en proponer el uso de efectos giroscópicos de grandes ruedas giratorias como dispositivo de control del balanceo, siendo un ejemplo de este tipo de dispositivo el presentado en la Figura 2-13. Este sistema se instaló en el destructor alemán See-Bar. El giroscopio Schlick presentaba algunos problemas para ajustar su rendimiento en función de la magnitud y la frecuencia de las olas, y aunque funcionó bien en el buque escogido por Schlick, no funcionó de la misma manera en otros buques. Es decir, fue más difícil de adaptar en otras plataformas. Es por eso por lo que la empresa estadounidense Sperry desarrolló un sistema que resolvía una deficiencia del giroscopio de Schlick, utilizando un motor eléctrico comandado por interruptores y un pequeño giroservo para controlar la precesión del giroscopio principal. En este caso, la velocidad de precesión era proporcional a la velocidad de balanceo del buque. En este momento este sistema presentaba un alto rendimiento, hasta una reducción de balanceo de un 95%. Su elevado coste, el aumento de peso y la gran tensión producida en el casco ocultaron sus ventajas e impidieron su desarrollo.

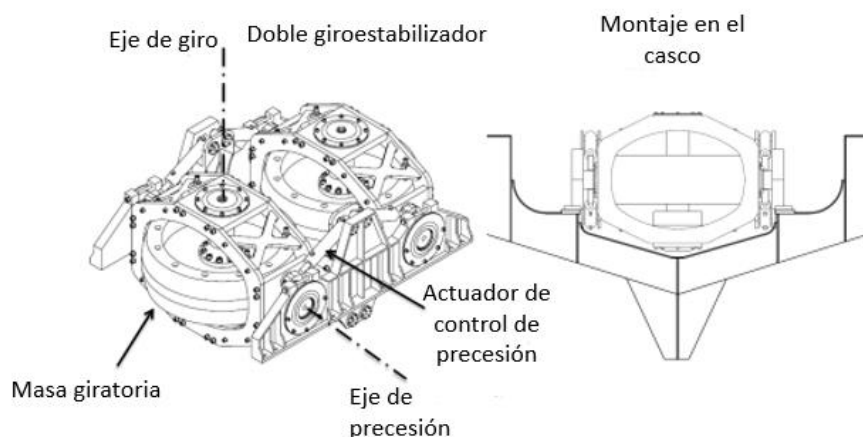


Figura 2-13 Giroestabilizador de doble rueda [8]

Como se ha comentado anteriormente, este sistema presentaba varias limitaciones, los cascos de estos tipos de barcos no estaban diseñados para soportar tanto peso. Además, cuando la mar era irregular e intensa, se necesitaban movimientos rápidos de los ejes de rotación de los giróscopos. Por el contrario, el sistema no era capaz de trabajar con suficiente velocidad produciendo un aumento en el movimiento de balanceo, en vez de trabajar contra él.

Finalmente, por aquella época, se llegó a la conclusión de que este método de estabilización no era rentable. Los requisitos de energía eran muy altos y el sistema no conseguía trabajar a la velocidad que la situación requería, provocando movimientos de balanceo contrarios a lo que realmente se requieren.

En la actualidad, este sistema ha evolucionado permitiendo su implementación en muchos barcos. Los nuevos estabilizadores son sistemas que constan de un volante de inercia el cual produce un gran momento controlado por un cilindro hidráulico, el cual es controlado por un ordenador que permite eliminar o reducir los balances. La principal evolución respecto al sistema del año 1930 es que este es pequeño y ligero, pudiendo utilizar en mucha variedad de barcos independientemente de su tamaño.

2.2.1.5 Aletas

Las aletas son uno de los sistemas más modernos para estabilización de barcos. Su origen es del año 1965, instalándose en los buques Michelangelo y Raffaello.

Los estabilizadores de aleta consisten en un par de hidro alas montadas en el costado del casco (Figura 2-14), la cuales son comandadas por un sistema de control para producir un momento de balanceo que contrarresta el momento inducido por las olas. La primera propuesta de estabilizadores de aleta fue realizada por S. Mortera del Astillero Nagasaki en Japón en 1923. El uso de estabilizadores de aleta activa aumentó después de la Segunda Guerra Mundial, cuando dos empresas en Inglaterra, Denny y Brown Brothers, desarrollaron este método de estabilización.

Las aletas o alas están situadas por debajo del nivel del mar, sobresaliendo del casco en dirección opuesta a crujía, más concretamente, para obtener el máximo rendimiento de las aletas es necesario que la separación entre la aleta de estribor y de babor sea la máxima posible. Por eso es conveniente que estén situadas en la zona de mayor manga del buque.

Este método produce un empuje hidrodinámico que permite la estabilización del barco. El principio de funcionamiento de las aletas es similar al de las alas de un avión, las aletas al moverse realizan un movimiento alternativo. Esto significa que cuando se eleva la aleta desde una de las bandas del barco, la otra desciende de manera inversa. Este movimiento origina en el buque un movimiento de balanceo determinado, en función a la escora indicada, el sistema ordena una inclinación determinada a las aletas para producir ese movimiento de balanceo. Por lo tanto, si el balanceo generado por el estabilizador

sobre el buque es igual o directamente opuesto al generado por la mar o el viento sobre el buque, ambos balances se componen, resultando en un movimiento de balanceo nulo, es decir, el equilibrio.



Figura 2-14 Aleta estabilizadora [9]

La ventaja principal de este sistema es que permite regular de manera automática la estabilidad de la plataforma. Esta característica es fundamental para barcos que realicen largas navegaciones, donde la confortabilidad de la dotación es necesaria. Es por ello por lo que en la actualidad es uno de los sistemas más utilizados debido a su gran capacidad de estabilización, fiabilidad y coste. Se emplea fundamental en cruceros y buques de pasajeros.

Una de las desventajas que se observan es que estas aletas aumentan el tamaño de la estructura del casco, provocando dificultades en las maniobras de entrada y salida de puerto. Las aletas son una de las partes más delicadas del buque a la hora de acercar la plataforma al muelle.

2.2.1.6 Timón

“Pieza plana y móvil montada en la parte posterior de una nave, que sirve para controlar su dirección en el plano horizontal”. Según la RAE, un timón se emplea para controlar la dirección en el plano horizontal de una embarcación, pero como se verá a continuación el timón es otro método de control de estabilización. Más concretamente, para tener un control óptimo del rumbo es necesario tener control del balance [7].

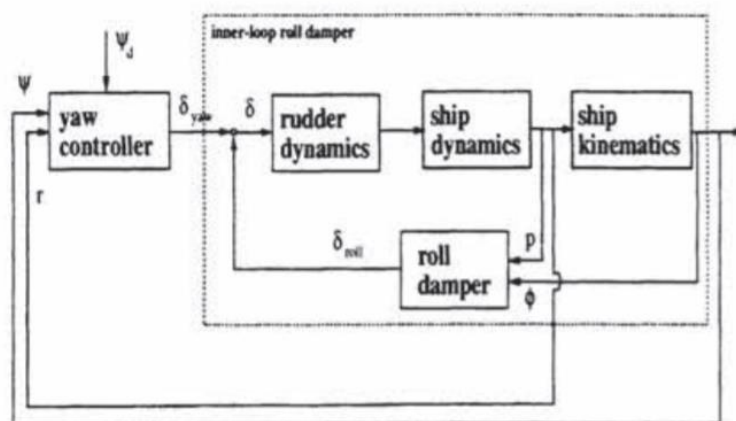


Figura 2-15 Controlador de balanceo (rápido) y controlador de guiñado (lento) [10]

La idea de utilizar el timón como dispositivo de estabilización surgió de las observaciones del comportamiento de balanceo del buque bajo el funcionamiento del piloto automático. Robert Taggart (1970) informó de una combinación inusual de circunstancias que se produjeron en el American Resolute

(buque portacontenedores) durante su travesía del Atlántico en invierno. El Resolute sufrió un balanceo excesivo cuando utilizaba el gobierno automático. A partir de los datos observados en este viaje y de un modelo construido para estudiar estas deficiencias, se llegó a la conclusión de que el elevado movimiento de balanceo observado era consecuencia de las altas frecuencias de guiñada, que hacían que el piloto automático produjera una actividad del timón cerca de la frecuencia natural de balanceo del buque. Entonces se planteó la idea de modificar el sistema de control del piloto automático para evitar estos efectos; sin embargo, el hecho de que el movimiento del timón pudiera producir un gran balanceo podría utilizarse como dispositivo desestabilizador. Unos años más tarde, Cowley y Lambert presentaron un estudio de estabilización del balanceo del timón utilizando simulaciones analógicas por ordenador y pruebas con modelos de un buque portacontenedores. Los ensayos en el mar posteriores al trabajo de Cowley y Lambertl, obtuvieron resultados alentadores.

Este trabajo motivó la exploración del timón estabilizador en el entorno naval en Reino Unido, donde Carley y Lloyd (1975) realizaron un trabajo donde no sólo analizaron las ventajas sino también las complicaciones asociadas al control de los estabilizadores del timón. En todos los análisis realizados de la época, se obtuvo unos resultados que ofrecían un rendimiento pobre de este control de estabilización.

No fue hasta la década de 1980 cuando los algoritmos de control empleados eran más avanzados y los ordenadores digitales permitieron obtener resultados experimentales más exitosos, donde se obtuvieron reducciones de ángulo del 50%.

No es aconsejable separar la función de control de rumbo y la función de control de balanceo en dos dispositivos distintos. El control óptimo de la plataforma solo es posible si la función de control de rumbo tiene en cuenta la función de control de balanceo y viceversa (esquema de control de balanceo y rumbo donde ambas órdenes se tienen en cuenta, representado en la Figura 2-15).

2.3 Modelado dinámico de embarcaciones

Como se ha comentado en el apartado 0, el mar es un medio inestable en el que una embarcación sufre una serie de fuerzas que actúan sobre ella, de forma que resultan movimientos como el balanceo y la cabezada. Para entender estos movimientos y oscilaciones es necesario definir modelo dinámico y aplicar las leyes de Newton.

La dinámica de una embarcación puede describirse mediante la siguiente estructura general (Fossen, 1994) [11]:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v$$

Ecuación 2-1

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = -\tau_h - \tau_c + \tau_d$$

Ecuación 2-2

donde las variables η y v representan el desplazamiento con respecto a un sistema de referencia inercial (n) empleado como origen de coordenadas y las velocidades con respecto a un sistema no inercial (b) que se mueve en una posición fija del cuerpo. Por otro lado, τ_h , τ_c y τ_d representan las fuerzas hidrodinámicas, las fuerzas ejercidas por los sistemas de control de la embarcación (timón, hélices) y de perturbación (olas y viento), respectivamente. Para describir el movimiento del buque se considera un marco de referencia (b) fijado al buque en el punto O_b y un marco geográfico local (n), que se considera fijo al nivel medio de agua en el punto O_n . Estos marcos de referencia se ven reflejados en la Figura 2-16 . La posición generalizada y el vector velocidad son los siguientes.

$$\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]$$

Ecuación 2-3

$$v = [u, v, w, p, q, r]^T$$

Ecuación 2-4

Los componentes de η son las posiciones (x, y, z) expresadas con respecto al sistema fijo O_n y los ángulos de Euler representan el balanceo ϕ , la cabezada θ y la guiñada ψ con respecto al sistema en movimiento fijado al buque O_b .

Los componentes de v son las velocidades lineales y angulares expresadas con respecto a O_b denominadas u-vaivén, v-abatimiento y w-escorzo. Los componentes del vector de velocidad angular expresados en el marco del cuerpo fijo son la velocidad angular de balanceo p , de cabezada q y de guiñada r . Estableciendo los vectores de fuerza generalizados sobre el marco del cuerpo fijo con la siguiente expresión:

$$\tau_i = [X_i, Y_i, Z_i, K_i, M_i, N_i]^T$$

Ecuación 2-5

donde los tres primeros términos son las fuerzas que provocan el vaivén, abatimiento y escorzo, respectivamente, y los tres términos siguientes son los momentos de balanceo, cabeceo y guiñada, siendo estos momentos expresados con respecto al sistema de referencia O_b .

DOF	Traslación	Fuerza	Velocidad lineal	Posición
1	Vaivén	X	u	x
2	Abatimiento	Y	v	y
3	Escorzo	Z	w	z
	Rotación	Momento	Velocidad angular	Ángulo
4	Balanceo	K	p	$\phi = \varphi$
5	Cabezada	M	q	θ
6	Guiñada	N	r	ψ

Tabla 2-1 Nomenclatura empleada en la descripción del movimiento del buque

La matriz de rotación $J(\eta)$ (Ecuación 2-1) relaciona las velocidades fijas al cuerpo con la derivada temporal de las posiciones generalizadas con respecto a O_n , que da la trayectoria del buque. La matriz M_{RB} en la Ecuación 2-2 es la matriz de inercia del cuerpo rígido, y $C_{RB}(v)$, también en la Ecuación 2-2, es la matriz de fuerzas de Coriolis y fuerzas centrípetas que son la consecuencia de la rotación del sistema O_b con respecto al sistema de referencia O_n .

Como se ha visto anteriormente, se puede determinar que una embarcación experimenta seis grados de libertad (conocidos como DOFs: “Degrees of freedom”), los cuales determinan la posición y orientación de la embarcación mediante desplazamientos y rotaciones. El movimiento de un barco en seis grados de libertad se considera como un movimiento de traslación (posición) en tres direcciones: abatimiento, vaivén y escorzo; y como un movimiento de rotación (orientación) en torno a tres ejes: balanceo, cabezada y guiñada [12].

Los tres movimientos de traslación, definidos anteriormente, se experimentan en las siguientes direcciones: el abatimiento (movimiento lateral producido, por ejemplo, por el viento) o la deriva (movimiento lateral debido a la corriente sobre la obra viva) en su eje lateral, el escorzo o arfada en su

eje vertical y por último el vaivén en su eje longitudinal (avance o retroceso). Por otro lado, la embarcación experimenta tres movimientos de rotación alrededor de sus tres ejes (longitudinal, transversal y vertical). El giro sobre el eje longitudinal 'X' (longitudinal) es el balanceo, movimiento oscilatorio también conocido como escora; el giro sobre el eje 'Z' (vertical) determina el rumbo (guiñada) del barco y por último el giro en torno al eje 'Y' (transversal) es la cabezada, todos ellos representados de manera gráfica en la Figura 2-16.

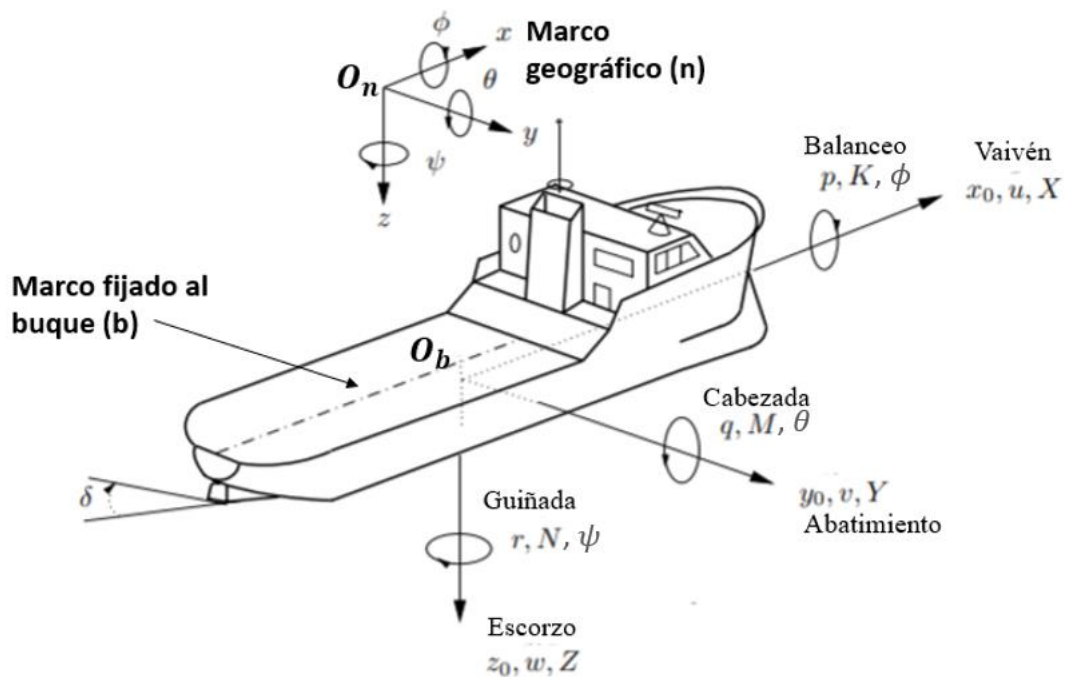


Figura 2-16 Representación de los 6 grados de libertad [12]

Por el contrario, y a pesar de tener seis grados de libertad, a la hora de realizar el estudio de la dinámica del movimiento de balanceo para el diseño de sistemas de control se suelen utilizar, normalmente, modelos más reducidos. La elección entre modelos de diferente complejidad depende del tipo de sistema de control considerando las condiciones en las que se vaya a realizar el diseño. Los modelos que suelen emplear son:

- 6 grados de libertad (6DOFs): es el modelo más completo, contiene todas las ecuaciones del movimiento para simular y estimar el comportamiento de las embarcaciones. Como se ha visto anteriormente en la Ecuación 2-5, los términos que lo componen son el abatimiento, escorzo, vaivén, balanceo, cabeceo y guiñada.
- 4 grados de libertad (4DOFs): es un modelo más simplificado, emplean situaciones de maniobra donde es importante incluir la escora para tratar de reducirla mediante el uso de aletas, timones o tanques como sistemas de control. Normalmente este modelo elimina el eje 'Z', teniendo en cuenta únicamente las variables que afectan a 'X' e 'Y', estas son el vaivén y balanceo y el abatimiento y el cabeceo.
- 1 grado de libertad (1DOF): es el modelo más simplificado. Se emplea para el diseño de controladores de velocidad de avance o retroceso, sistemas de estabilización de balanceo (escora) o pilotos automáticos (virada).

Los modelos definidos anteriormente, diferenciados por sus grados de libertad, pueden ser empleados para diferentes finalidades, como por ejemplo para realizar simulaciones en tiempo real del comportamiento de una embarcación frente a diferentes fuerzas, para el diseño de un sistema

controlador-observador o para desarrollar estimadores paramétricos. Dentro de estas finalidades se diferencian tres modelos:

- **Modelo de simulación:** consiste en un modelo de alta fidelidad que incluye los seis grados de libertad para la simulación de mecanismo en el dominio del tiempo. Siendo la descripción más adecuada de un sistema, incluye el sistema de propulsión, la dinámica de la embarcación, de medida y las fuerzas del entorno (factores meteorológicos, oleaje, viento, corriente).
- **Modelo de control:** es una versión más simplificada del modelo de simulación, el cual se emplea para diseñar sistemas de mecanismos de control. Este es el método que se empleará en este trabajo.
- **Modelo del observador:** es una versión simplificada del modelo de simulación donde tiene más prioridad la medida del ruido, situaciones de fallo, capacidades de estima, predicción de movimiento y filtrado. El propósito principal de este modelo es capturar las dinámicas adicionales a los sensores de navegación, así como perturbaciones.

2.4 Modelado dinámico del balanceo de un barco (1DOF)

2.4.1 Puntos de referencia

Antes de comenzar el desarrollo del modelo de un grado de libertad del balanceo dinámico de un barco (1DOF), es importante definir una serie de puntos de referencia que ayudaran a comprender mejor el sistema. Como se ha visto anteriormente (2.3), los movimientos que experimenta una embarcación debido a sus seis grados de libertad y el propio peso del buque junto con las cargas que lleve a bordo (desplazamiento) provocan a su vez la aparición de una serie de conceptos que afectan directamente a la posición de equilibrio de una embarcación.

2.4.1.1 Flotación

El plano de flotación es la superficie horizontal que interseca el casco del buque a la altura del nivel del mar. Esta línea se denomina línea de flotación y el área que encierra esta línea se llama superficie o área de flotación. Dentro de esta área destaca un punto característico, el centro de flotación (F). Este punto es el centro de gravedad del área de la superficie de flotación, debido a la simetría transversal del buque y cuando el buque este adrizado, 'F' estará sobre el plano diametral como se observa reflejado en la Figura 2-17 [13].

El centro de gravedad (G) es el punto de aplicación de todos los pesos del buque, sumando el desplazamiento en rosca (buque vacío) y todos aquellos pesos añadidos posteriormente. Cuando se cumpla que el desplazamiento del buque sea igual al empuje que sufre y se encuentren situados en el mismo, determinará que el buque se encuentra en una posición de equilibrio.

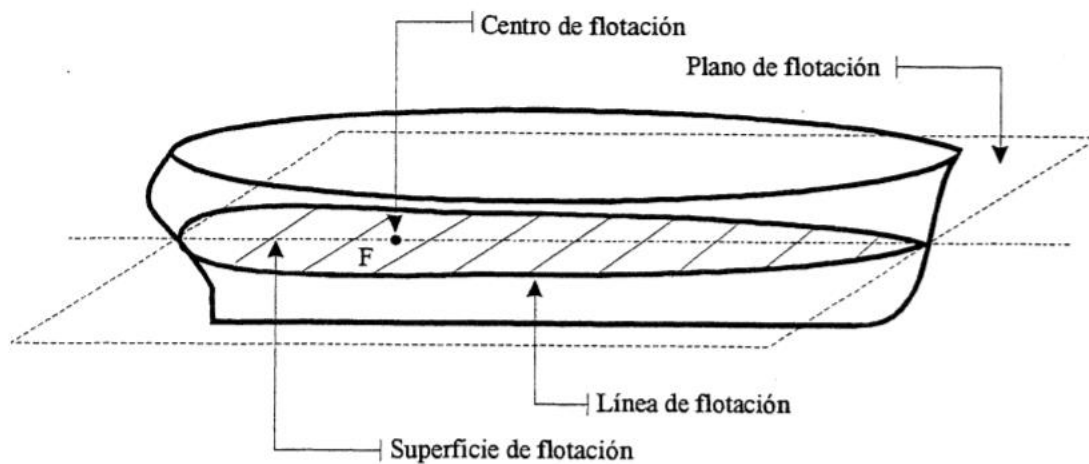


Figura 2-17 Flotación [13]

2.4.1.2 Carena

El volumen sumergido o de carena del buque es el volumen limitado por el casco y por la superficie de flotación. Dentro de este volumen, destaca el centro de carena (C), el cual es el centro de gravedad sumergido (se ve representado en la Figura 2-18). Más concretamente el centro de carena es el centro de presión del agua sobre el casco y está relacionado con el centro de empuje vertical.

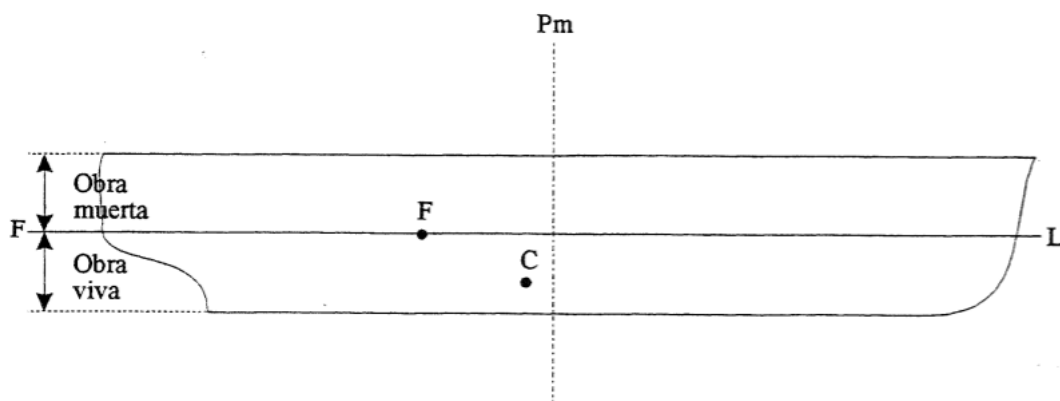


Figura 2-18 Obra viva y obra muerta [13]

Además, la línea de flotación marca el límite entre la obra viva y la obra muerta. Como se ha visto en el apartado 2.2, la obra viva la parte del buque por debajo de la superficie de flotación, por lo tanto, correspondiente a la carena. Y la obra muerta la parte por encima de la línea de flotación.

2.4.1.3 Metacentro

Por último, se destaca el metacentro (M), que se define como la intersección de la línea que une los centros de carena (C) con los centros de gravedad (G). Determinando que el buque está en equilibrio cuando GM (distancia que hay del centro de gravedad al metacentro) es positiva. Es por eso por lo que se definen dos metacentros distintos [14].

- Metacentro transversal: es el punto de intersección de las líneas verticales trazadas desde el centro de carena a pequeños ángulos de escora consecutivos (Figura 2-19).

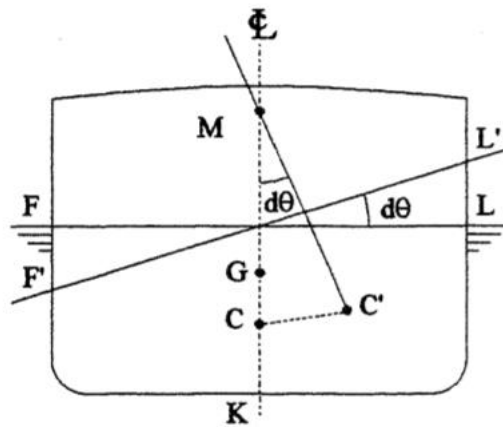


Figura 2-19 Metacentro transversal [13]

- Metacentro longitudinal: es el punto de intersección de las líneas verticales trazadas desde el centro de carena a pequeños ángulos de cabezada consecutivos (Figura 2-20).

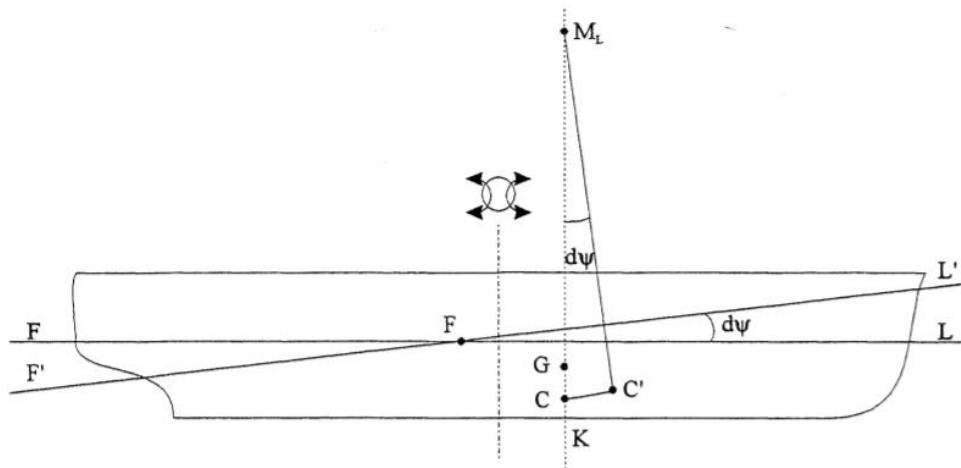


Figura 2-20 Metacentro longitudinal [13]

Por último, hay que aclarar que los valores propios a las ecuaciones del movimiento de una embarcación con seis grados de libertad son independientes del punto de referencia, pero las ecuaciones desacopladas producirán resultados incorrectos si se formulan en un punto diferente a F.

2.4.2 Fuerzas generadas por superficies de control

Las superficies de control, como los timones o las aletas laterales, forman parte, junto al sistema de propulsión, de los mecanismos de control de los que disponen los barcos para controlar su movimiento y las condiciones de maniobrabilidad que puede presentar.

Cuando un fluido se mueve en relación con una lámina y hay un pequeño ángulo de incidencia (o ángulo de ataque efectivo) entre el flujo y la lámina, el flujo permanece adherido a la superficie de la lámina, y aparecen las siguientes fuerzas en la lámina: L (Lift), en dirección perpendicular al flujo, y D (Drag) en la dirección del flujo, como se muestra en la Figura 2-21.

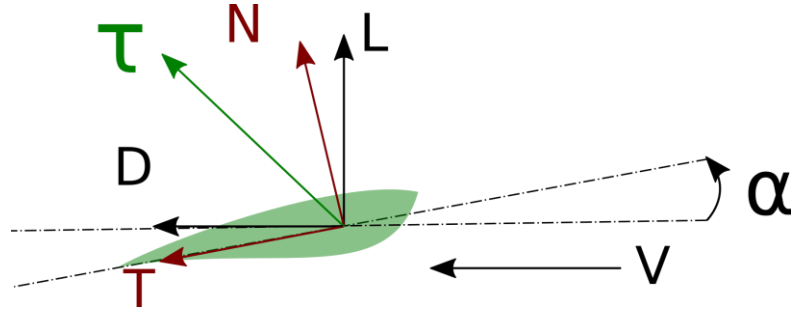


Figura 2-21 Modelado hidrodinámico de la aleta [Elaboración propia]

El modelado hidrodinámico de las fuerzas generadas suele ser expresado mediante las siguientes ecuaciones:

$$L = 0.5 \rho U^2 A_f l_f C_l(\alpha_e)$$

$$D = 0.5 \rho U^2 A_f l_f (C_{D0} + C_l^2(\alpha_e)/(0.9\pi\alpha_e))$$

Ecuación 2-6

donde ρ es la densidad del agua, U es la velocidad de la embarcación, A_f es el área de la aleta, l_f es la longitud de la aleta, C_l es el coeficiente de sustentación y α_e es el ángulo efectivo de la aleta. Es habitual aproximar el coeficiente de Lift $C_l(\alpha)$ por una ecuación lineal, tal y como puede apreciarse en la Figura 2-24. Las fuerzas tangencial y normal inducidas por la aleta pueden calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$N = D \sin \alpha_e + L \cos \alpha_e$$

$$T = D \cos \alpha_e - L \sin \alpha_e$$

Ecuación 2-7

en donde α_e es el ángulo efectivo que se obtiene como:

$$\alpha_e = -\alpha - \alpha_f$$

Ecuación 2-8

siendo α el ángulo de control de la aleta y α_f el ángulo de corrección inducido por la velocidad relativa del balanceo cuyo valor es:

$$\alpha_f = \arctan\left(\frac{r_f p}{U}\right)$$

Ecuación 2-9

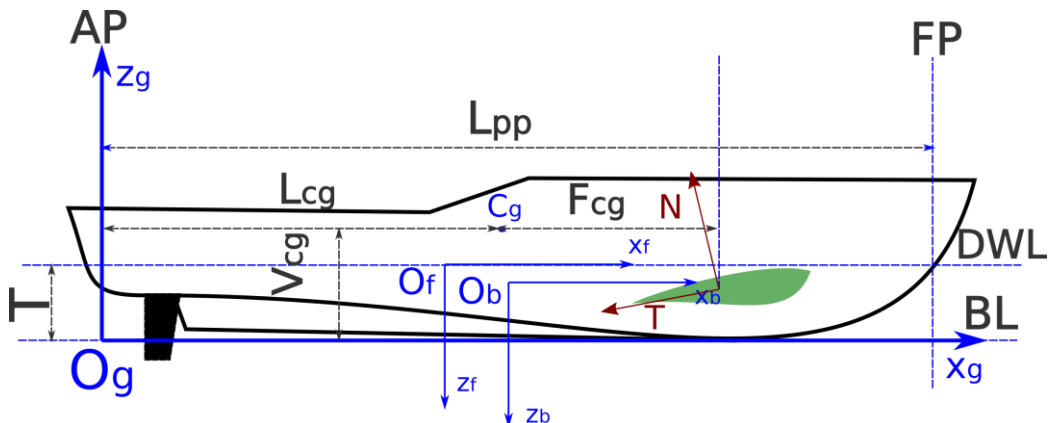


Figura 2-22 Vista lateral de la embarcación [Elaboración propia]

En la Figura 2-22 se muestra una vista lateral de la embarcación, en donde se ha añadido el sistema de referencia geométrica O_g , así como las fuerzas generadas por la aleta lateral.

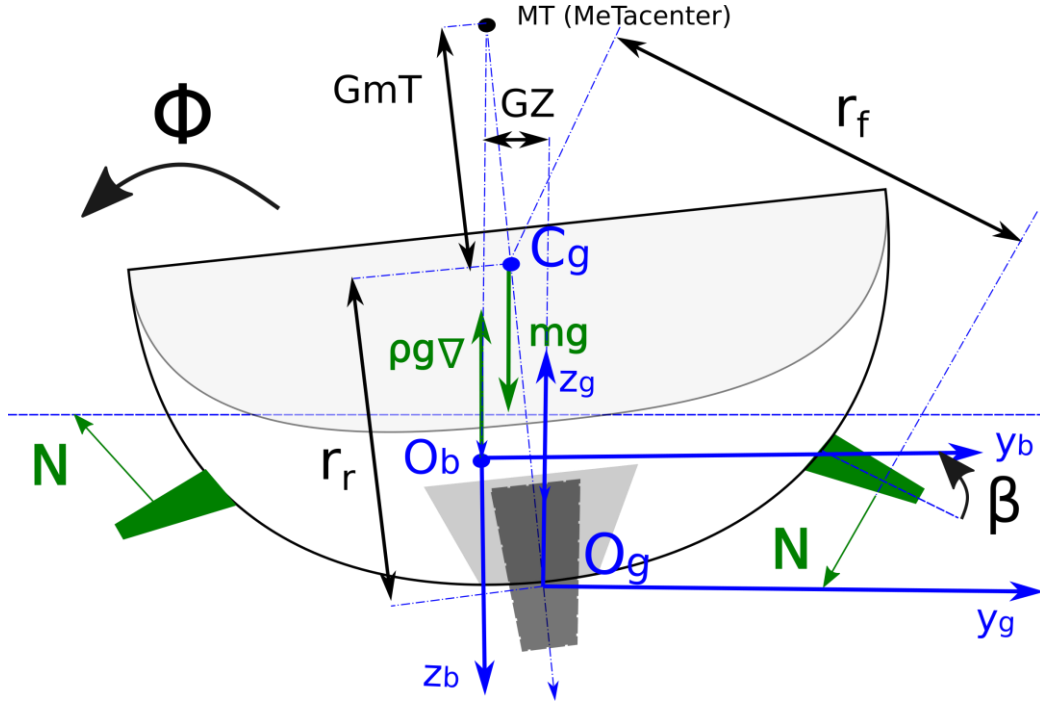


Figura 2-23 Vista trasera de la embarcación [Elaboración propia]

En la Figura 2-23 se muestra una vista trasera de la embarcación donde se observa el centro de referencia geométrica. Asimismo, se representa la distancia r_f , la cual es la distancia entre C_g y N , parámetro fundamental para obtener el ángulo de corrección inducido por la velocidad relativa de balanceo (α_f).

Asumiendo ángulos de control pequeños, y siguiendo los argumentos expuestos por T. Perez en su trabajo [15], las fuerzas y momentos de cada aleta pueden aproximarse como:

$$\begin{aligned} X_{fin} &\approx -T \\ Y_{fin} &\approx -N \sin(\beta) \\ K_{fin} &\approx r_f N \\ N_{fin} &\approx F_{CG} N \sin(\beta) \end{aligned}$$

Ecuación 2-10

donde X_{fin} , Y_{fin} son las fuerzas longitudinales en los ejes X e Y del sistema Ob, y K_{fin} y N_{fin} son los pares generados por cada aleta con respecto al balanceo y al cabeceo, respectivamente.

2.4.3 Modelo de un grado de libertad (1DOF)

El modelo representado en la Ecuación 2-2 presenta una descripción general del comportamiento de una embarcación incluyendo los seis factores que le afectan: abatimiento, vaivén, escorzo, balanceo, cabezada y guiñada. Como se ha visto en el apartado anterior (2.3), en las aplicaciones para control y diseño se reduce el modelado de seis grados de libertad a un modelado con un número inferior. Para estudiar la dinámica del movimiento del balanceo, se suele emplear modelos 1DOF o 4DOFs, dependiendo del escenario a considerar. Para el modelado de 1DOF, sólo se tiene en cuenta la dinámica del balanceo y se emplea si se asume que en este escenario el barco se mueve en línea recta a velocidad constante. Este modelo se describe de la siguiente manera [8]:

$$\dot{\phi} = p$$

$$I_x \dot{p} = K_h + K_c + K_d$$

Ecuación 2-11

donde ϕ es el ángulo de balanceo y p es la velocidad angular de balanceo. Por otro lado, en la Ecuación 2-11, se define I_x con el momento de inercia del cuerpo rígido respecto al eje 'X', dirigido desde la popa a la proa (como se observa en la Figura 2-16).

El momento hidrodinámico K_h puede aproximarse mediante la siguiente ecuación:

$$K_h = K_p \dot{p} + f_1(\phi, \dot{\phi}) + f_2(\phi)$$

Ecuación 2-12

donde $K_p \dot{p}$ representa el momento de inercia hidrodinámico y K_p se denomina el momento de inercia añadido; $f_1(\phi, \dot{\phi})$ es el momento de amortiguación y $f_2(\phi)$ es el momento restaurador.

El momento activo que produce una aleta puede determinarse mediante los cálculos expuestos en el apartado anterior. El valor del coeficiente de sustentación empleado en esos cálculos se obtiene a partir de experimentos sobre un modelo real [16], de forma que los resultados experimentales muestran que la relación entre el coeficiente de sustentación y el ángulo de las aletas no es una relación lineal ideal, sino que presentan unas curvas cerradas como se representa en la Figura 2-24. Hay un error entre el valor teórico y el valor real; es decir, el error existe en la retroalimentación de los estabilizadores de aleta. Por lo tanto, el estabilizador de aleta tiene dificultades para resistir con precisión la perturbación de las olas, lo que reducirá el efecto de balanceo.

Mode	Velocidad	Oscilación	Periodo de oscilación	Frecuencia adimensional
Mode 1	3.0	25	2.467	0.06
Mode 2	3.0	25	3.700	0.04
Mode 3	3.0	25	4.933	0.03
Mode 4	3.0	25	6.167	0.024
Mode 5	3.0	25	7.400	0.02

Tabla 2-2 Estado experimental de la aleta [16]

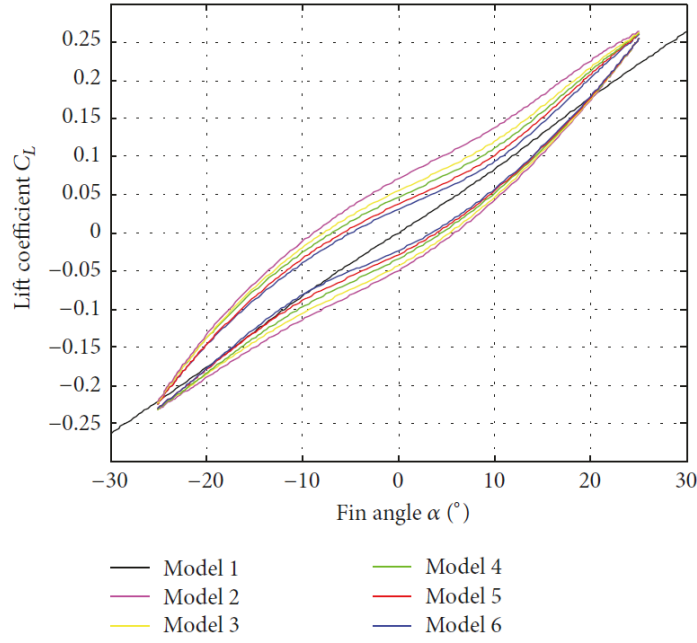


Figura 2-24 Relación entre coeficiente de sustentación y el ángulo de la aleta [16]

En el estudio de la dinámica del balanceo de los buques, se suele considerar que el momento perturbador K_d es inducido por las olas. Debido a las características estocásticas inherentes a las olas, un cálculo preciso de las fuerzas de excitación de las olas es un reto. Por ello, se adopta un método de aproximación del momento inducido por las olas (K_d) bajo el supuesto de olas regulares [17].

La mayoría de los trabajos tienen en cuenta las incertidumbres en la dinámica del balanceo y algunas estrategias de control robusto han demostrado su eficacia, como la estimación adaptativa de parámetros, el control de la estructura variable de modelos deslizantes o el control H_∞ . En general, se considera una incertidumbre generalizada, ignorando modelos con grados superiores (por ejemplo, modelos de tercer orden o superiores) y algunas dinámicas no modeladas (por ejemplo, la interacción entre la aleta y el casco). En conclusión, un modelo de dinámica con una incertidumbre generalizada puede describirse como:

$$(I_x + K_p)\ddot{\phi} + f_1(\phi, \dot{\phi}) + f_2(\phi) + \Delta_1(\phi, \dot{\phi}, \alpha) = K_d - K_\alpha \alpha$$

Ecuación 2-13

$$f_1 = K_p \phi + K_{p|\dot{p}|} \dot{\phi} |\dot{\phi}|$$

Ecuación 2-14

$$f_2 = T (C_1 \phi + C_3 \phi^3 + C_5 \phi^5)$$

Ecuación 2-15

donde la incertidumbre generalizada viene representada por $\Delta_1(\phi, \dot{\phi}, \alpha)$.

2.4.4 Dinámica de la aleta

Durante la búsqueda sobre el control de estabilización mediante una aleta, se han propuesto varios sistemas de control avanzado, sin embargo, muchos de ellos ignoran el efecto de la dinámica del actuador de la aleta. Esto es razonable para el caso en el que la respuesta de la aleta se produce de forma instantánea, lo que deriva en una constante de tiempo del actuador mucho menor que la respuesta del buque. Por el contrario, suponiendo que ambas constantes de tiempo no son demasiado diferentes e

ignorando la dinámica del actuador de la aleta puede no solo degradar el rendimiento del sistema de bucle cerrado, sino que también puede influir negativamente en la estabilidad del buque.

Simplificando, se define la dinámica de un actuador de aleta mediante un sistema lineal de primer orden de la siguiente forma:

$$T_e \dot{\alpha} = K_\alpha \alpha_c - \alpha$$

Ecuación 2-16

donde T_e es la constante de tiempo del actuador, K_α la ganancia de entrada de control, α_c el ángulo de aleta ordenado.

2.5 Modelado dinámico de la trayectoria y balanceo de un barco (4DOF)

Como se ve en el apartado 2.3, considerando un barco como un cuerpo rígido, las ecuaciones no lineales de seis grados de libertad del movimiento del barco pueden obtenerse mediante la ley de Newton [18]. Dado que en este apartado se va a desarrollar el modelo dinámico de la trayectoria y balanceo para analizar el funcionamiento del estabilizador de aleta como reductor del movimiento de escora y balanceo causado por el giro del barco y por las perturbaciones ambientales, se puede despreciar los estados de cabeceo y arfada o escorzo, y en consecuencia su influencia en los otros cuatro grados de libertad. Por lo tanto, el modelo de cuatro grados de libertad (Figura 2-25) teniendo en cuenta la posición (x, y), el balanceo (roll) y la guiñada (yaw) puede obtenerse mediante las ecuaciones definidas en la Tabla 2-3.

Expresiones del modelo 4DOF

$$X = m(\dot{u} - vr - X_G r^2 + Z_G pr)$$

$$Y = m(\dot{v} + ur - Z_G \dot{p} + X_G \dot{r})$$

$$K = I_x \dot{p} - mZ_G(\dot{v} + ur)$$

$$N = I_z \dot{r} + mX_G(\dot{v} + ur)$$

Tabla 2-3 Modelo 4DOF [19]

En las ecuaciones expuestas, se tiene que m es la masa del barco, X_G y Z_G son las coordenadas del centro de gravedad (CG) en los ejes X y Z, respectivamente, I_x y I_z son los momentos de inercia sobre los ejes X y Z, u y v son las velocidades de avance y de deriva del barco, p y r son las velocidades angulares de balanceo y de guiñada, X e Y son las fuerzas que actúan sobre el casco en la dirección de los ejes X e Y, respectivamente, K y N son los momentos que actúan sobre el casco en torno a los ejes X y Z, respectivamente. Vinculado a esto es necesario desarrollar una serie de expresiones que desarrollan tanto de las fuerzas como de los momentos que actúan sobre el casco, los cuales dependen directamente de las fuerzas y momentos provocados por la hidrodinámica del barco, las perturbaciones producidas por el oleaje, la aleta estabilizadora, el timón del barco y los sistemas de propulsión. A continuación, se desarrollarán todas las expresiones que explican las fuerzas y momentos que actúan sobre el casco (X, Y, K, N).

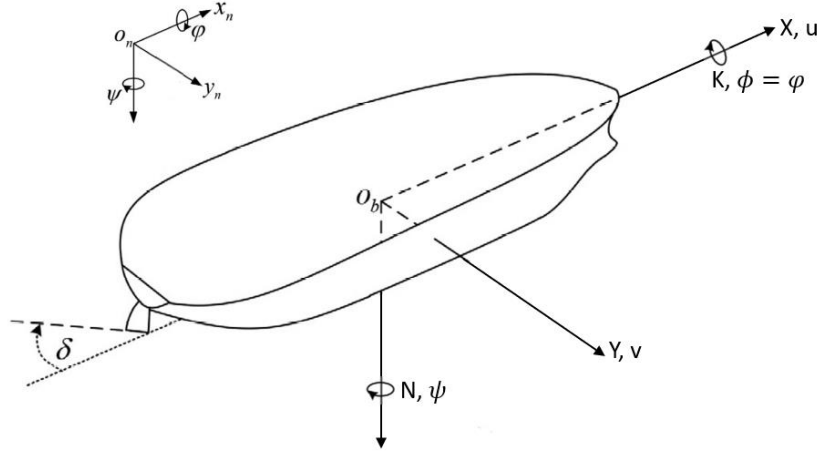


Figura 2-25 Representación gráfica 4DOF [Elaboración propia]

2.5.1 Fuerzas y momentos hidrodinámicos

Las fuerzas y momentos hidrodinámicos pueden expresarse en forma de funciones no lineales de la posición, la velocidad y la aceleración del buque, y están influidas por el estado del buque y las características del fluido [20]. De esta forma, la expresión hidrodinámica no lineal se adopta como [15]:

$$\begin{aligned}
 X_{hyd} &= X_{\ddot{u}}\ddot{u} + X_{u|u}|u| + X_{vr}vr \\
 Y_{hyd} &= Y_{\ddot{v}}\ddot{v} + Y_{\ddot{p}}\ddot{p} + Y_{\ddot{r}}\ddot{r} + Y_{|u|v}|u|v + Y_{ur}ur + Y_{v|v}|v|v + Y_{v|r}|v|r + Y_{r|v}|r|v + \\
 &\quad Y_{\phi|uv}|\phi|uv| + Y_{\phi|ur}|\phi|ur| + Y_{\phi uu}\phi uu \\
 K_{hyd} &= K_{\ddot{v}}\ddot{v} + K_{\ddot{p}}\ddot{p} + K_{|u|v}|u|v + K_{ur}ur + K_{v|v}|v|v + K_{v|r}|v|r + K_{r|v}|r|v + K_{\phi|uv}|\phi|uv| + \\
 &\quad K_{\phi|ur}|\phi|ur| + K_{\phi uu}\phi uu + K_{|u|p}|u|p + K_{|p|p}|p|p + K_p p + K_{\phi\phi\phi}\phi\phi\phi - \rho g \nabla GZ(\phi) \\
 N_{hyd} &= N_{\ddot{v}}\ddot{v} + N_{\ddot{r}}\ddot{r} + N_{|u|v}|u|v + N_{|u|r}|u|r + N_{r|r}|r|r + N_{r|v}|r|v + N_{\phi|uv}|\phi|uv| + N_{\phi|ur}|\phi|ur| + \\
 &\quad N_{|p|p}|p|p + N_p p + N_{|u|p}|u|p - N_{\phi u|u}|\phi u|u|
 \end{aligned}$$

Ecuación 2-17

donde ρ es la densidad del fluido, g es la aceleración de la gravedad, ∇ es el desplazamiento del barco, ϕ es el ángulo de balanceo, $GZ(\phi)$ es la curva del brazo adrizante y el resto de los parámetros son los coeficientes hidrodinámicos del barco, los cuales tiene un valor determinado establecido mediante test de identificación paramétrica y valores de diseño constructivo del barco.

2.5.2 Fuerzas y momentos generados por las aletas

Las expresiones de las fuerzas generadas por las dos aletas se obtienen a partir de los cálculos realizados asumiendo que ambas aletas son iguales y mantienen el mismo ángulo, es decir, son simétricas. De esta forma, aplicando el modelo de fuerzas y momentos de aletas expuesto en el capítulo anterior, se obtiene:

$$\begin{aligned}
 X_{fin} &\approx -2T_f \\
 Y_{fin} &\approx 2N_f \sin(\beta_{fin}) \\
 K_{fin} &\approx -2r_f N_f \\
 N_{fin} &\approx -2FCG N_f \sin(\beta_{fin})
 \end{aligned}$$

Ecuación 2-18

2.5.3 Fuerzas y momentos generados por el timón

La gran mayoría de los buques dependen de uno o más timones verticales instalados para realizar las maniobras de guiñada [21]. Los timones suelen instalarse después de la hélice, por debajo de la línea de popa del buque. Según [22], las fuerzas y momentos inducidos por el timón pueden obtenerse como muestra la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}X_{rud} &= -D_r \delta \\Y_{rud} &= L_r \delta \\K_{rud} &= -r_r L_r \delta \\N_{rud} &= -LCG L_r \delta\end{aligned}$$

Ecuación 2-19

donde r_r y LCG son los brazos de balanceo y guiñada del timón, respectivamente, δ es el ángulo de inclinación de la aleta y L_r y D_r son las fuerzas de sustentación y arrastre generadas en el timón, respectivamente.

2.5.4 Fuerzas y momentos generados por la hélice

La mayoría de los buques dependen de hélices bajo la línea de flotación en la popa para proporcionar potencia de avance. En condiciones normales, se puede considerar que las hélices sólo producen una fuerza longitudinal que impulsa el barco hacia delante o hacia atrás. De esta manera, cuando el barco navega en línea recta a una velocidad constante, el empuje efectivo T_e generado por la hélice es igual a la resistencia del barco X_r . Perez [15] sugirió que la resistencia del barco puede considerarse aproximadamente igual a $-X_{|u|u}U^2$, siendo U la velocidad de navegación del buque. Por otro lado, Martin [21] señaló, mediante simulación, que para un buque que gira a una velocidad fija, el empuje generado por las hélices durante el proceso de guiñada puede ser aproximadamente igual a la fuerza antes del giro y permanece inalterada para simplificar el estudio. En consecuencia, se determina la siguiente expresión para obtener las fuerzas y momentos generados por la hélice:

$$\begin{aligned}X_{prop} &= -X_{|u|u}U_o^2 \\Y_{rud} &= 0 \\K_{rud} &= 0 \\N_{rud} &= 0\end{aligned}$$

Ecuación 2-20

donde $X_{|u|u}$ es el coeficiente hidrodinámico relacionado con la velocidad de oleaje, y U_o es la velocidad inicial antes del giro.

2.6 Modelado de perturbaciones externas: oleaje

El principal diseño de aletas estabilizadoras tiene la finalidad de poder alcanzar un estado estable del barco que permita una comodidad a la dotación, es por eso por lo que se tienen que establecer un modelo que simule estas perturbaciones. La práctica habitual en la modelización de las perturbaciones inducidas por el oleaje que actúan sobre un barco consiste en modelar las olas del mar como un proceso estocástico [23]. Este método caracteriza la frecuencia de las olas del mar mediante una densidad espectral de potencia. Para el desarrollo de este modelo, entre otras opciones disponibles, se utiliza el espectro formulado por Pierson Jr. y Moskowitz [24], donde la formulación espectral del oleaje fue concebida para mares generados por el viento totalmente desarrollados en el océano Atlántico Norte de la siguiente manera:

$$S(\omega) = A_g \omega^{-5} \exp(-B_g \omega^{-4}) [m^2 s]$$

Ecuación 2-21

donde $A_g = 8.1 \times 10^{-3} g^2$ y $B_g = 3.14/H_s^2$ y $H_s [m]$ es la altura significativa de la ola. A una determinada frecuencia de onda $\omega = \omega_0$ [rad/s], estableciéndose ω_0 como la frecuencia modal que es cuando la densidad espectral de potencia alcanza su valor máximo. Esta frecuencia modal o de pico se calcula con la Ecuación 2-22.

$$\omega_0 = \left(\frac{4B_{ww}}{5} \right)^{1/4}$$

Ecuación 2-22

En esta ecuación se muestra que diferentes alturas de ola (H_s) corresponden a diferentes frecuencias modales ω_0 y, por tanto, a diferentes valores de pico de $S(\omega)$. El modelo de oleaje puede ser aproximado por un sistema dinámico lineal de segundo orden, expresado de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \dot{d} \\ d^w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_o^2 & -2\zeta_w \omega_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ d^w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_w \end{bmatrix} w_n$$

$$y_w = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} d \\ d^w \end{bmatrix}$$

Ecuación 2-23

donde w_n es un ruido de proceso blanco de valor medio cero, ζ_w es un coeficiente de amortiguación que puede fijarse en un valor constante, de tal forma que Lijun Wang [25] estable en su trabajo un valor para el coeficiente de amortiguación de 0.1. Hay que tener en cuenta que las perturbaciones inducidas por las olas vienen dadas por $M_w = d^w$. Además, $k_w = 2\zeta_w \omega_o \sigma_w$ donde σ_w es una constante que describe la intensidad de la ola. El parámetro σ_w puede calcularse como la raíz cuadrada de $S(\omega_0)$. Además, para un barco que se mueve con una velocidad de avance U , la frecuencia máxima del espectro de la ola se modificará de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\omega_e = \omega_0 - \frac{\omega_0^2}{g} U \cos \beta$$

Ecuación 2-24

donde ω_e [rad/s] es la frecuencia de encuentro y β [rad] es el ángulo de encuentro entre el rumbo y la dirección de la ola. La Ecuación 2-24 implica que la frecuencia de un espectro de ola que se mueve a una velocidad de avance $U > 0$ debe ser modificada a ω_e .

2.7 Control no lineal adaptativo de balance

El control en modos deslizantes (*Sliding Mode Control* SMC) es uno de los enfoques que se ha propuesto en la literatura para hacer que el control sea robusto a las perturbaciones e incertidumbres. El control en modos deslizantes tradicional, también conocido como control de modo deslizante de primer orden, se caracteriza por una entrada de control saturada y discontinua. Sobre la base de este enfoque múltiple se han aportado soluciones, con propuestas de modos deslizantes avanzados incluyendo variedades deslizantes recursivas no lineales, superficies deslizantes adaptativas con carácter integral, dinámicas de orden completo no lineal o superficies deslizantes con parámetros de amortiguamiento adaptativo.

El algoritmo de modo deslizante denominado *SuperTwisting* (STW) es una de las soluciones en modos deslizante de segundo orden (SOSM) que ha sido ampliamente aplicado en control y observación. Como las dinámicas relacionadas con este algoritmo son discontinuas, sus soluciones se interpretan en el denominado sentido de Filippov, por lo que la selección de un valor adecuado para las ganancias del algoritmo pueden ser un problema difícil en aplicaciones prácticas, principalmente debido a dos cuestiones: los fenómenos de picos, como los generados en observadores de altas ganancias, y el denominado *chattering*, que se trata de la aparición de altas frecuencias en la señal de control que pueden desestabilizar el comportamiento dinámico. Las dos posibles causas del *chattering* en las respuestas de estado estacionario son: el uso de funciones no continuas, como la función de signo de valor fijo que se utiliza en controles clásicos de modo deslizante como el STW, y el proceso de discretización, que puede introducir vibraciones en la respuesta de estado estable si las ganancias son lo suficientemente grandes, incluso si todas las funciones son continuas, siempre que la dinámica del sistema se caracterice por componentes de alta frecuencia con respecto al tiempo de muestreo seleccionado.

La implementación práctica de soluciones que eviten estos fenómenos, como es el caso de la aplicación de sistemas homogéneos implica la necesidad de establecer marcos de discretización que aseguren que la propiedad de los sistemas continuos se mantiene cuando son implementadas en sistemas digitales, lo cual implica la necesidad de integrar soluciones de integración más complejas que el clásico algoritmo de Euler.

Con base en los resultados antes mencionados, y con el fin de mantener el proceso de discretización de forma simple, existen otros trabajos en donde se introduce una ley de superficie adaptativa de modo deslizante no lineal y diferenciable, es decir, eliminando el carácter impulsivo relativo a las funciones de signo empleadas en el SMC clásico, pero permitiendo mantener una de las propiedades básicas alcanzadas por los modos no continuos: la estabilización en tiempo finito, en lugar de una estabilización asintótica.

Para conseguir este resultado se parte de la formulación generada por el algoritmo STW en donde a partir de una superficie de deslizamiento ($\sigma(t)$), en donde se cumplen las dinámicas de control deseadas, cuya definición genera el siguiente modelo dinámico:

$$\dot{\sigma}(t) = u(\sigma) + d(t)$$

Ecuación 2-25

donde $d(t)$ es una perturbación desconocida que tenemos que compensar calculado la variable de control $u(t)$ de forma que se asegure que $\sigma = 0$, para lo cual el algoritmo STW define el control en la Ecuación 2-26.

$$u(\sigma) = -\lambda \sqrt{|\sigma|} \text{sign}(\sigma) - \epsilon(t)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = \kappa \text{sign}(\sigma)$$

Ecuación 2-26

De esta forma la dinámica de la variable deslizante se obtiene de la siguiente forma.

$$\dot{\sigma}(t) = -\lambda \sqrt{|\sigma|} \text{sign}(\sigma) + \omega(t)$$

$$\dot{\omega}(t) = -\beta \text{sign}(\sigma) + \dot{d}(t)$$

Ecuación 2-27

Una aproximación suave, es decir, empleando funciones continuamente diferenciables, permite obtener resultados similares que evitan la aparición del efecto de *chattering* incluso cuando se aplica el método de Euler para obtener el sistema discreto equivalente. De esta forma la forma de control propuesta es:

$$u(\sigma) = -\lambda \sigma(t) - \beta \tanh(\gamma \sigma) - \epsilon(t)$$
$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{\lambda^2}{4} \sigma(t) + \kappa \tanh(\gamma \sigma)$$

Ecuación 2-28

De esta forma la dinámica de la variable deslizante se obtiene con la Ecuación 2-29.

$$\dot{\sigma}(t) = -\lambda \sigma(t) - \beta \tanh(\gamma \sigma) + \omega(t)$$
$$\dot{\omega}(t) = -\frac{\lambda^2}{4} \sigma(t) - \kappa \tanh(\gamma \sigma) + \dot{d}(t)$$

Ecuación 2-29

El cálculo de las ganancias λ, β, γ y κ se realiza en base al desarrollo teórico que se apoya en un diseño frecuencial que puede ser consultado en la referencia *Finite Time Adaptive Smooth Non Linear Sliding Mode Control for Second Order Dynamic Systems*, que en el momento de entrega de este trabajo se encuentra en proceso de revisión en una revista del cuartil Q1. En este trabajo se muestra, empleando teoría de Lyapunov, las características de estabilización que el algoritmo indicado pueden generar evitando la aparición de oscilaciones de alta frecuencia o *chattering*.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Introducción

En este capítulo de la memoria se exponen los recursos empleados para el desarrollo de una herramienta que permita la simulación de este sistema de control de balanceo. Asimismo, se muestran los modelos desarrollados en el programa utilizado, con la finalidad de obtener una simulación lo más semejante a la realidad, que permita analizar el rendimiento diferentes aletas estabilizadoras para diferentes tipos de barcos. En conclusión, el objetivo principal de este capítulo es obtener un modelo que permita simular el funcionamiento de las aletas estabilizadoras como sistema de control de balanceo, de tal forma que permita diseñar y analizar su funcionamiento dependiendo de sus características y del escenario de simulación generado (tamaño del barco, pesos, tipos de oleaje, etc.).

3.2 Medios empleados para el desarrollo del proyecto

A la hora de comenzar con el desarrollo del modelo se plantearon varias opciones para realizar su simulación, entre los que destacaban diferentes lenguajes como Python, C o Matlab. Finalmente, y como se expone a continuación, el programa que se ha implementado para el desarrollo del modelo es Matlab, más concretamente, la herramienta de Simulink.

3.2.1 Matlab

Matlab es una plataforma de programación diseñada específicamente para ingenieros y científicos, siendo su característica principal su propio lenguaje, lenguaje de Matlab, un lenguaje basado en matrices que permite la expresión más natural de las matemáticas computacionales. Este lenguaje es un lenguaje de matriz/array o arreglo de alto nivel, el cual contiene, estructuras de datos y otras características de programación orientada a objetos. De manera que permite programación en lo pequeño para crear rápidamente programas desechables, como la programación a lo grande para crear programas de aplicación completos, grandes y complejos.

Esta plataforma contiene tareas informáticas, de visualización y programación, las cuales se pueden manejar de forma fácil, en comparación con otros softwares de programación, y las soluciones y resultados se expresan en notación matemática conocida. Entre sus tareas más comunes destacan, por ejemplo: matemáticas y conmutación, desarrollo de algoritmos, modelado, simulación y prototipos, etc.

Matlab es un sistema interactivo en el que su elemento básico de datos es un array que no requiere dimensionamiento. De esta manera, el usuario puede solucionar diferentes tipos de problemas con formularios vectoriales y matriciales, es decir, Matlab es una herramienta que nos permite solucionar este tipo de problemas de manera más sencilla que con programas en otro lenguaje como por ejemplo en C.

Como se ha comentado anteriormente, dentro de las tareas más comunes destaca el modelado y simulación, entorno en el que se ha trabajado durante el desarrollo de este proyecto. De modo que junto con Matlab se ha empleado la herramienta de Simulink, la cual permite al programador combinar la programación textual y gráfica en un mismo entorno.

3.2.2 Simulink

Simulink es una caja de herramientas especial de Matlab que sirve para simular el comportamiento de los sistemas dinámicos, el cual puede simular sistemas lineales y no lineales, modelos en tiempo continuo y tiempo discreto y sistemas híbridos de todos los anteriores. Es un entorno de diagramas de bloque que se utiliza para diseñar sistemas con modelos multidominio, simular antes de implementar en hardware y desplegar sin necesidad de escribir código. Como una extensión de Matlab, Simulink añade muchas características específicas a los sistemas dinámicos, mientras conserva toda la funcionalidad de propósito general de Matlab. De manera que este programa no es completamente un programa separado de Matlab, sino un anexo a él, donde el entorno de Matlab siempre está disponible mientras se ejecuta una simulación.

Simulink tiene dos fases de uso: la definición del modelo y el análisis del modelo. La definición del modelo se basa en construir el modelo a partir de elementos y parámetros básicos establecidos previamente, tal como, integradores, bloques de ganancia, etc. Respecto al análisis del modelo, se refiere a realizar la simulación, linealización y determinar el punto de equilibrio de un modelo previamente definido. Para la simplificar la definición del modelo se emplean una clase de ventanas denominadas bloques, en las que se puede crear y editar un modelo gráficamente usando el ratón, sin necesidad de escribir código. Además, Simulink utiliza un ambiente gráfico lo que hace sencillo la creación de los modelos de sistemas. Después de definir un modelo este puede ser analizado seleccionando una opción desde los menús de Simulink o utilizando comandos desde la interfaz de Matlab.

En definitiva, Simulink permite definir de una forma lógica las etapas del proceso del cálculo y el flujo de datos entre ellas, utilizando bloques, los cuales se pueden emplear para representar un solo elemento del proceso o bien un subsistema, siendo fácilmente modificable para reflejar un cambio en el algoritmo o el enfoque del diseño. De tal forma que estos diagramas de bloques permiten una descripción en alto nivel del sistema, proporcionando una estructura jerárquica para evaluar el comportamiento de algoritmos alternativos bajo diferentes condiciones de funcionamiento. Simulink es una de las herramientas más usadas en ingeniería de control y procesamiento de señal para la simulación de sistemas de control y el diseño basado en modelos.

3.2.3 App.Designer

Por último, hemos utilizado la herramienta de App.Designer, la cual ofrece Matlab para desarrollar aplicaciones, más concretamente, es un entorno de desarrollo interactivo para diseñar una aplicación y programar su comportamiento. Proporciona una versión totalmente integrada del editor de Matlab y un gran conjunto de componentes interactivos. También ofrece un administrador de diseño de cuadrículas para organizar la interfaz de usuario y opciones de reordenación automáticas para hacer que su aplicación detecte y responda a los cambios del tamaño de la pantalla. Permite distribuir aplicaciones empaquetándolas en los archivos del instalador directamente desde la barra de herramientas de App.Designer, o bien creando una aplicación web o de escritorio independiente [26].

3.3 Desarrollo del modelo con un grado de libertad (1DOF)

3.3.1 Modelo de aprendizaje

Como se ha visto en el apartado 2.4.3 en el modelo 1DOF se considera únicamente la dinámica del movimiento del balanceo. De esta manera el sistema que se ha escogido para la realización de la simulación se basa en el modelo de Yang Yiang (2004) [27], el cual es un modelo que simplifica el

sistema de control, permitiendo aplicarlo en Simulink y dejando al usuario adaptarse al entorno del programa. Este sistema se reduce a la Ecuación 3-1.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi \\ \dot{\phi} \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi \\ a_1\phi + a_2\dot{\phi} + a_3\alpha \Delta'_1 + K'_d \\ a_4\alpha + \Delta'_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix} \alpha_c$$

Ecuación 3-1

Para poder realizar las pruebas y observar los resultados mientras se producen las simulaciones se hizo necesario emplear los denominados buses virtuales en Simulink, además de tener que añadir una función de *callback* que envíe, en cada paso de la simulación, los datos a la herramienta de visualización para actualizar las gráficas mientras se produce la simulación.

A continuación, en la Figura 3-1, se observa de manera genérica el desarrollo del modelo.

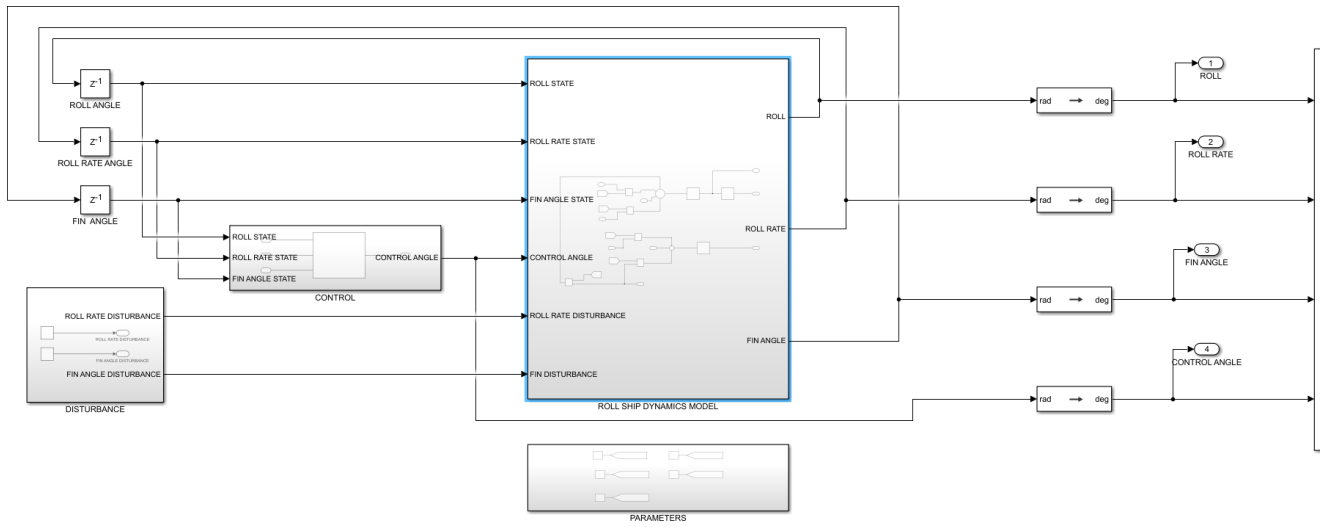


Figura 3-1 Modelo de un grado de libertad [Elaboración propia]

En el sistema diseñado se muestra la simulación del modelo de control simplificado donde se pueden diferenciar varios bloques, los cuales realizan funciones diferentes con la finalidad de que el conjunto de bloques simule el balanceo. El primer bloque (Figura 3-2) a destacar es el bloque de parámetros (Parameters), donde se establecen los cinco parámetros que reducen el sistema. Como se representa en la Ecuación 3-1 estos parámetros vienen representados por: $a_1 = -0.0106$, $a_2 = -0.0117$, $a_3 = -0.043$, $a_4 = -0.5$ y $b = 0.5$.

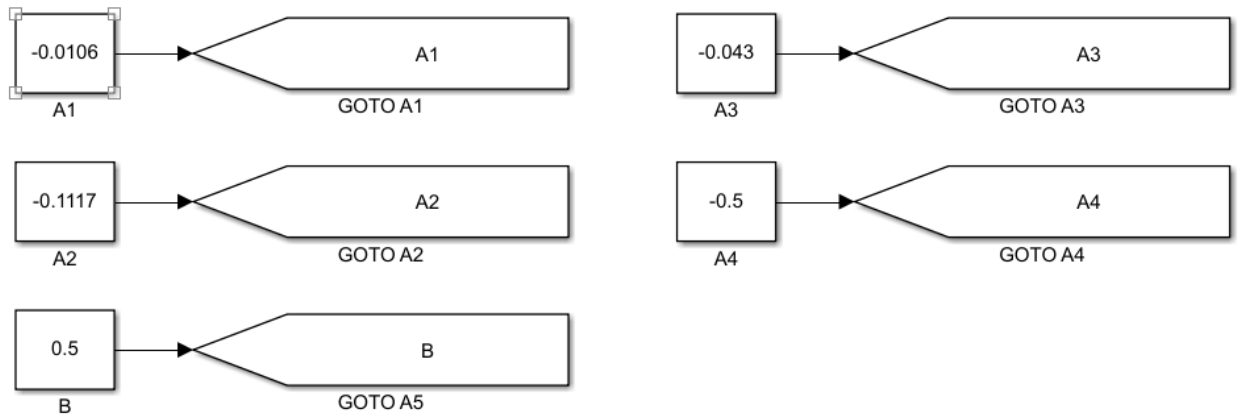


Figura 3-2 Parámetros del modelo de Yang Yiang [Elaboración propia]

El segundo bloque (Figura 3-3) se emplea para definir el sistema de la dinámica de balanceo del buque (Roll ship dynamics model, este bloque es el que viene seleccionado en la Figura 3-1) donde se desarrolla el modelo simplificado definido en la Ecuación 3-1. Este subsistema tiene seis entradas: ángulo de balanceo (Roll state), velocidad de balanceo (Roll rate state), ángulo de la aleta (Fin angle state), ángulo de control (Control angle), la perturbación de balanceo (Roll rate disturbance) y la perturbación de la aleta (Fin disturbance); y tres salidas: ángulo de balanceo (Roll), velocidad de balanceo (Roll rate) y ángulo de la aleta (Fin angle). Al compilar el programa se analizarán estos tres parámetros de salida, los cuales vienen representados en tres gráficas, que permitirán determinar el correcto funcionamiento del modelo.

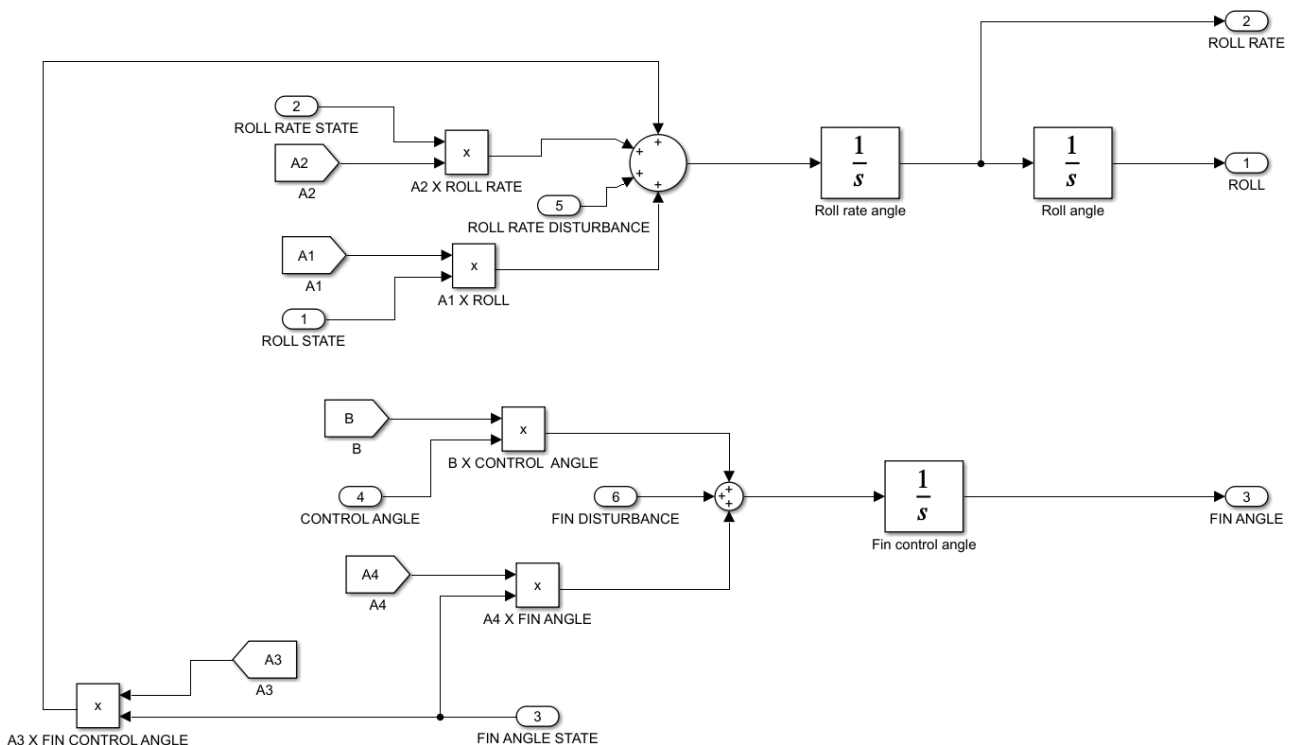


Figura 3-3 Dinámica del modelo de balanceo Yang Jiang [Elaboración propia]

En la Figura 3-3 se observa el modelo de la dinámica de balanceo presentado por Yang Jiang [27], y que se ve reflejado en la Ecuación 3-1. Los parámetros de entrada al bloque (A1, A2, A3, A4 y B) se implementan mediante la función *From*, la cual permite llamar a los parámetros que se encuentran en el subsistema Parameters, de este modo se pueden modificar estos parámetros en este subsistema y se

modificarán de manera automática en todo el programa. Por otro lado, se introducen los parámetros variables mediante *Inputs* los cuales reciben sus valores numéricos desde el sistema general. Estos son: la perturbación de balanceo, la cual tiene un valor igual a cero; la perturbación de la aleta, a la que se le ha establecido un seno; por último, el control de balanceo se ha establecido como la mitad del ángulo de balanceo.

A continuación, se desarrolla el sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas utilizando todos los parámetros y los operadores necesarios, en este caso sumar y multiplicar. De esta forma se obtienen dos resultados: la aceleración de balanceo, la cual se integrará dos veces para obtener la velocidad de balanceo (Roll rate) y el ángulo de balanceo (Roll); y la velocidad angular de la aleta, la cual se integrará para obtener el ángulo de la aleta. Además, es importante destacar que el modelo está diseñado para trabajar con radianes, pero para nosotros es más fácil interpretar los resultados si están en grados, por eso se utiliza la función de *Angle conversion* para transformar estos valores a grados antes de ser representados en las gráficas. Finalmente, estos tres parámetros junto con el de control de balanceo se visualizan por medio de la herramienta *Scope* de Simulink, la cual presenta estos resultados en la Figura 3-4.

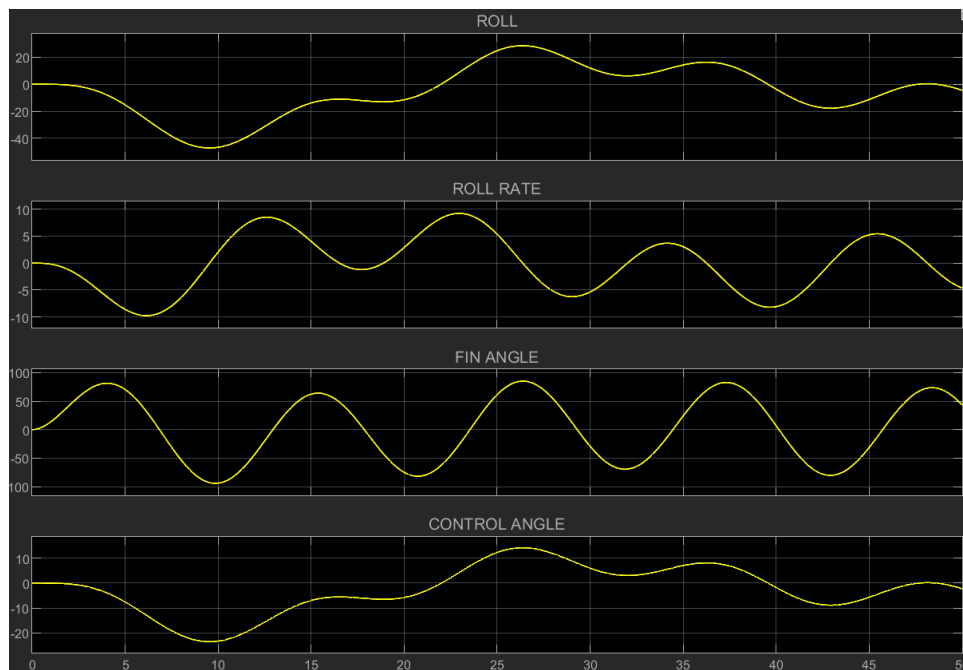


Figura 3-4 Resultados gráficos del modelo Yang Jiang [Elaboración propia]

En estas cuatro gráficas se presentan el ángulo de balanceo, velocidad de balanceo, ángulo de la aleta y ángulo de control. Los resultados que se obtienen respecto a la simulación de balanceo son coherentes con los resultados expuestos en el trabajo de referencia empleado para crear el modelo.

Para poder realizar el estudio del rendimiento de diferentes tipos de aletas estabilizadoras en diferentes barcos, es necesario disponer de una serie de parámetros modificables que permitan su simulación y posterior análisis. En el modelo de Yang Jiang, se establecen cinco parámetros constantes relacionados con unos parámetros de velocidad, tamaño de aletas y medidas estructurales del barco determinadas, pero en este trabajo no se establece la forma en la que se obtienen esas cinco constantes.

Debido a esto, esta simulación no es útil para el estudio y análisis del funcionamiento de aletas con diferentes tamaños en barcos con medidas estructurales distintas, aunque por su simplicidad ha resultado de interés para establecer una etapa de aprendizaje de manejo de la herramienta Simulink. De esta forma, se considera que este modelo simplificado se ha utilizado para diseñar una primera simulación la cual enseñe al alumno a desarrollar sistemas dinámicos más complejos en Simulink.

3.3.2 Modelo teórico

Con el objetivo de avanzar en el conocimiento de las dinámicas del movimiento de los barcos con aletas estabilizadoras para controlar el movimiento de balanceo, se procedió a emplear una segunda referencia en la que fuese posible realizar pruebas con diferentes parámetros y que además no implementase ningún tipo de simplificación lineal que reduzca la precisión de la simulación respecto a un sistema real. Tras analizar varias opciones, finalmente, se ha realizado el análisis del rendimiento de las aletas empleando el modelo que desarrolla Isah Abdulrasheed Jimoh [28]. Este modelo se reduce a un sistema no lineal de tres ecuaciones que se presenta de la siguiente forma:

$$\begin{cases} \dot{\phi} = p \\ \dot{p} = f(\phi, p) + b\alpha + M_w \\ y = x \end{cases}$$

Ecuación 3-2

donde $\phi(rad)$ es el ángulo de balanceo, p (rad/s) es la velocidad de balanceo y α (rad) es el ángulo de gobierno del estabilizador de aleta, es decir, la entrada de control. La dinámica de balanceo del buque está representada por $f(\phi, p)$, el momento inducido por las olas que actúan sobre el buque es M_w , y $b\alpha = M_c$ denota los momentos de control por unidad de inercia resultantes de las aletas estabilizadoras. El momento de control generado por el estabilizador por unidad de momento de inercia puede definirse explícitamente con la Ecuación 3-3.

$$M_c = -\frac{\rho U^2 A_f l_f C_L^\alpha}{I_{xx} + J_{xx}} \alpha$$

Ecuación 3-3

Por otro lado, la dinámica de balanceo del buque viene expresada por la Ecuación 3-4.

$$f(\phi, p) = a_1 \phi + a_2 \phi^3 + a_3 \dot{\phi} + a_4 \dot{\phi} |\dot{\phi}|$$

Ecuación 3-4

Se puede observar que ambas expresiones son similares a las que se ven el apartado 2.4.3, donde el momento de control generado no se establecía por unidad de momentos de inercia y la dinámica de balanceo establecía una expresión de grado cinco. A continuación, se denotan todos los parámetros variables correspondientes a las expresiones desarrolladas anteriormente.

Parámetro	Expresión
$a_1 =$	$-\frac{Th}{I_{xx} + J_{xx}}$
$a_2 =$	$\frac{Th}{(I_{xx} + J_{xx})\phi_v^2}$
$a_3 =$	$-\frac{D_N}{I_{xx} + J_{xx}} - \frac{\rho U^2 A_f l_f^2 C_L^\alpha}{(I_{xx} + J_{xx})U}$
$a_4 =$	$-\frac{D_W}{I_{xx} + J_{xx}}$
$D_N =$	$\frac{2n_1 \sqrt{Th(I_{xx} + J_{xx})}}{\pi}$

Parámetro	Expresión
$D_W =$	$\frac{3n_2(I_{xx} + J_{xx})}{4}$
$I_{xx} + J_{xx} =$	$\frac{TB_s^2}{g} \left(0.3085 + \frac{0.0227B_s}{d} - \frac{0.00043L}{100} \right)^2$

Tabla 3-1 Parámetros del modelo Isah Abdulrasheed Jimoh

En la Tabla 3-1 se muestran todos los parámetros que se utilizan en este modelo, los cuales se han desarrollado a lo largo del trabajo a excepción de D_N y D_W , los cuales representan los momentos de amortiguación lineal y no lineal del movimiento del balanceo, respectivamente. Por último, es importante determinar las unidades que se deben emplear en cada uno de los parámetros, debido a que este fue uno de los principales problemas que se encontraron en el desarrollo de la simulación del modelo de Hassan Ghassemi [29]. De esta forma, las unidades que se determinan en este modelo se establecen en la Tabla 3-2.

Parámetros			
ϕ	Ángulo de balanceo (rad)	T	Desplazamiento (Kg)
$\dot{\phi}$	Velocidad de balanceo (rad/s)	h	Altura metacéntrica (m)
$\ddot{\phi} = \ddot{\phi}$	Aceleración de balanceo (rad/s ²)	ϕ_v	Flooding angle (rad)
α	Ángulo de la aleta (rad)	n_1	Coeficiente de prueba
ρ	Densidad (kg/m ³)	n_2	Coeficiente de prueba
U	Velocidad de avance del barco (m/s)	B_s	Manga (m)
A_f	Área de la aleta (m ²)	g	Gravedad (m/s ²)
l_f	(m)	L	Eslora (m)
C_L^α	Coeficiente de lift	d	Calado (m)

Tabla 3-2 Nomenclatura del modelo Isah Abdulrasheed Jimoh

3.3.2.1 Desarrollo del modelo en Simulink

Con el planteamiento matemático de los sistemas de control de estabilización con aletas desarrollado, pero antes de implementar el modelo en Simulink, es necesario precisar de una fuente que proporcione todos estos parámetros (Tabla 3-2). La tarea de encontrar esta información ha sido compleja, principalmente por dos razones, la primera razón es debido a que estos parámetros son muy específicos, de tal forma que en muchos artículos científicos se determinaban algunos de ellos, pero no desarrollaban todos, por lo que esos documentos se descartaron. Por otro lado, la segunda razón es el ejemplo que se explica en el apartado 3.3.1, donde Yang Jiang desarrolla un modelo para una situación determinada, pero este modelo no permite ampliar sus aplicaciones para comprobar otro tipo de plataformas.

En consecuencia y tras la búsqueda en muchos documentos, se decide emplear el artículo científico ‘An adaptive neural network approach for ship stabilization via fin control’ de la revista Neurocomputing [30]. De este documento se han obtenido todas las características específicas de un barco, junto con las características del modelo de las aletas estabilizadoras. De esta manera ya se disponen de todas las herramientas necesarias para desarrollar la simulación en el programa y su posterior análisis.

Una vez establecido el modelo que cumple todos los requisitos necesarios para poder ser implementado en Simulink, se comienza con el desarrollo del modelo en el programa. De la misma forma que se desarrolló el modelo de aprendizaje se realiza este modelo, se explicarán empezando por el bloque o sistema más genérico hasta desarrollar los parámetros más específicos que tengan cada subsistema. A continuación, en la Figura 3-5 se muestra el modelo que simula la dinámica genérica de un barco.

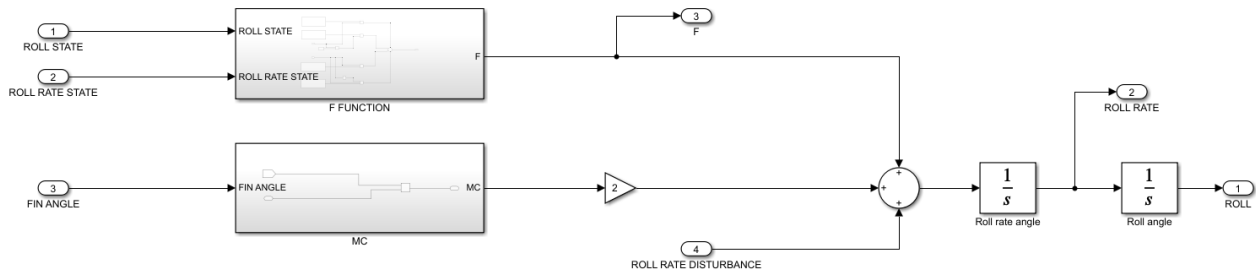


Figura 3-5 Dinámica genérica de un barco de Isah Abdulrasheed [Elaboración propia]

Se diferencian tres estados dentro del desarrollo del modelo: el primero son las entradas, donde se dispone de la velocidad de balanceo (Roll rate), la aceleración de balanceo (Roll rate state), el ángulo de la aleta (Fin angle) y las perturbaciones producidas por el oleaje (Roll rate disturbance); en el segundo se presentan dos subsistemas que desarrollan las funciones principales del modelo, siendo el subsistema MC el momento de control generado por el estabilizador y el subsistema F la función $f(\varphi, p)$ que define la dinámica de balanceo de barco; por último, se obtienen un resultado, la aceleración de balanceo (roll rate state), el cual se integra dos veces, una para obtener la velocidad de balanceo y otra para obtener el ángulo de balanceo.

La función principal de este bloque es simular el comportamiento del barco a medida que el sistema de control lo estabiliza a través de las aletas cuando experimenta perturbaciones. A continuación, se explica el subsistema que desarrolla el momento de control (MC):

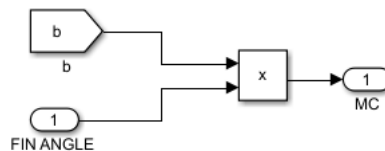


Figura 3-6 Momento de control generado por el estabilizador [Elaboración propia]

En la Figura 3-6 se muestra un producto de dos parámetros, el ángulo de la aleta y el parámetro b , el cual se llama mediante la función *From*, obteniéndose el momento de control. El parámetro b se implementa en el bloque de parámetros de la siguiente forma:

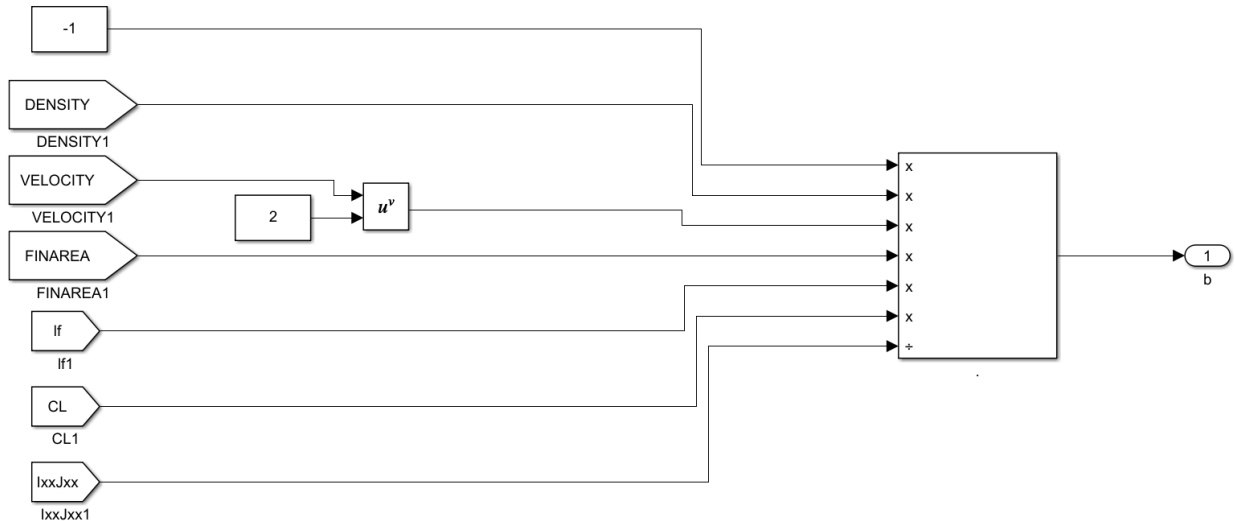


Figura 3-7 Parámetro b [Elaboración propia]

Este sistema desarrolla la Ecuación 3-3 a excepción del ángulo de la aleta, el cual se añade en el subsistema MC (Figura 3-6). Básicamente, el sistema presentado en la Figura 3-7 se realiza una multiplicación de una serie de parámetros, los cuales llama mediante la función *From*, obteniéndose el producto b .

Por otro lado, el otro subsistema que se muestra en la Figura 3-5 es el que desarrolla la dinámica de balanceo del buque (F), implementándose de la siguiente forma.

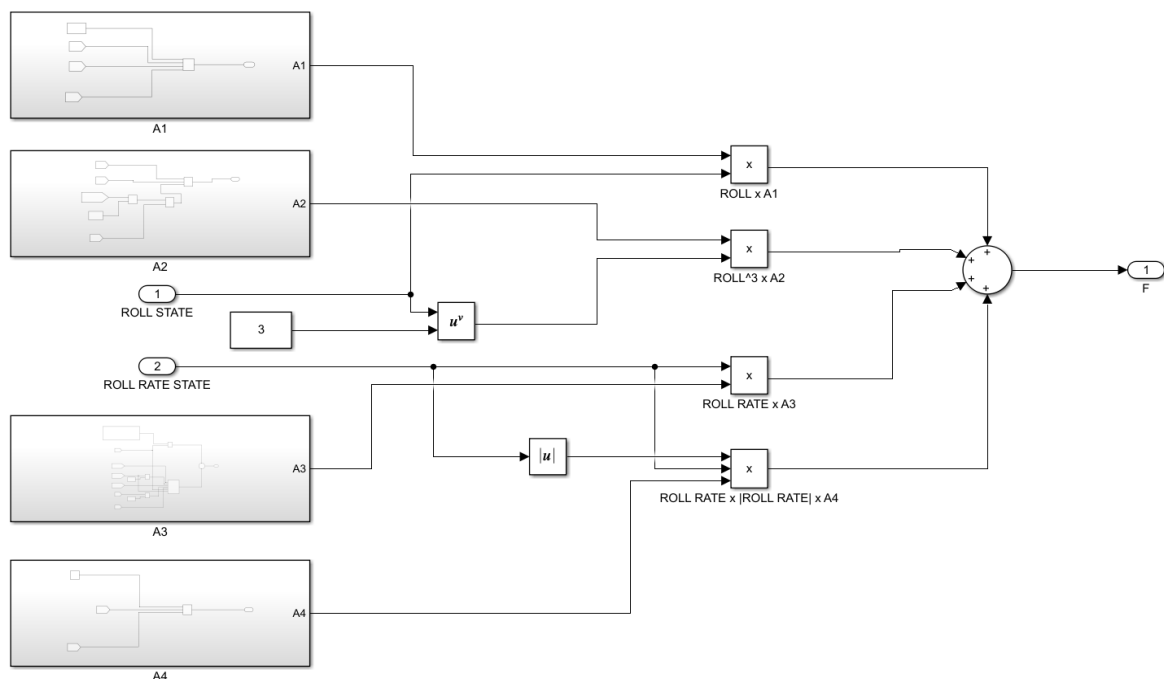


Figura 3-8 Dinámica de balanceo del buque (F) [Elaboración propia]

En este sistema se desarrolla la función definida en la Ecuación 3-4. En la Figura 3-8 se pueden diferenciar tres partes: la primera de ellas son las entradas 'Roll rate' y 'Roll rate angle' y los cuatro parámetros definidos con cuatro subsistemas; la segunda son los operadores, entre los que se diferencian, de izquierda a derecha, una potencia, un valor absoluto, cuatro multiplicadores y un sumatorio; por último, se obtiene la salida F . Como se ha comentado anteriormente, en la Figura 3-8 se muestran cuatro bloques que definen los cuatro parámetros desarrollados en la función $f(\varphi, p)$. A continuación, y

debido a la complejidad del parámetro se explica el subsistema A3 que define el parámetro a_3 . Por el contrario, los otros tres subsistemas (A1, A2, A4) no se explican ya que siguen el mismo formato que el subsistema A3, siendo bloques compuestos por un operador y varios parámetros (todas estas expresiones establecidas en la Tabla 3-1) que resultan en los tres coeficientes necesarios para el desarrollo del bloque F (Figura 3-8).

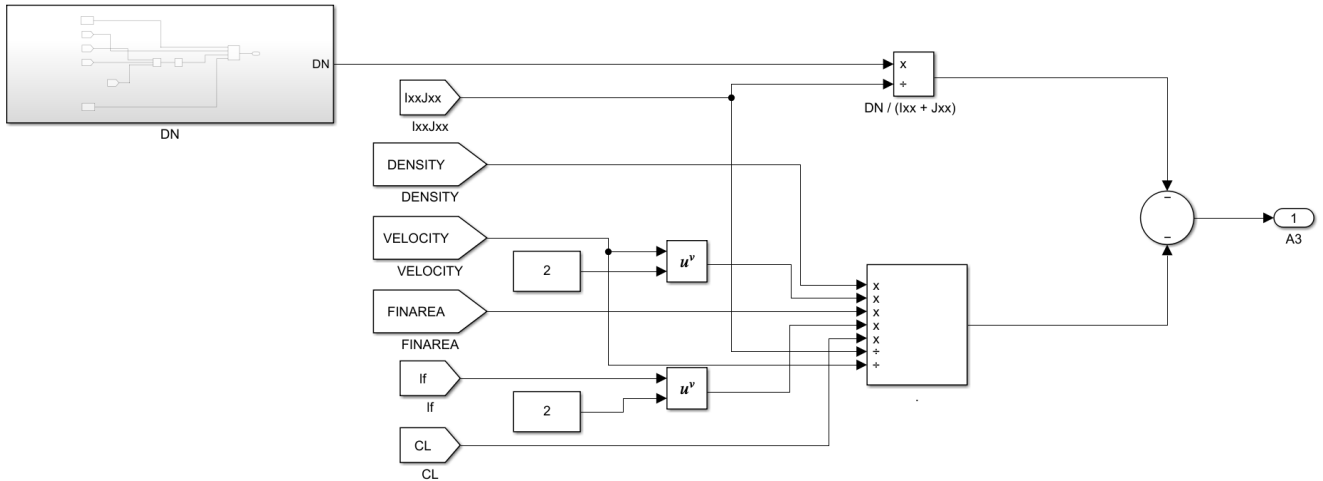


Figura 3-9 Parámetro A3 [Elaboración propia]

De la misma manera que en el desarrollo de la dinámica de balanceo (Figura 3-8) se diferencian tres partes en este subsistema (Figura 3-9). En primer lugar, se establecen todos los parámetros que se necesitan para desarrollar esta función, incluyendo el subsistema DN definiendo el parámetro D_N establecido en la Tabla 3-1. En segundo lugar, se añaden todos los operadores que se emplean en esta función, siendo dos potencias, dos multiplicadores y un sumatorio. Finalmente se obtiene la salida A3.

El conjunto de subsistemas que se han desarrollado anteriormente se corresponde con el modelo que desarrolla la dinámica balanceo de un barco con sistema de estabilización integrado. Como se estableció en los objetivos del proyecto, la finalidad del desarrollo del modelo en Simulink es conseguir una herramienta que permita comparar el rendimiento de un barco con este sistema de control de estabilización frente a otro que no lo tenga, pero además es interesante comparar los resultados cuando se considera también un barco con aletas estabilizadoras fijas, es decir, con un ángulo de control nulo. Esto motiva que en el modelo general desarrollado en Simulink se establece este bloque repetido tres veces (Figura 3-10). Adicionalmente, para el funcionamiento correcto de la simulación del modelo hay que alimentar las cuatro entradas establecidas en la Figura 3-6, las dos primeras entradas ('Roll rate' y 'Roll rate state') se retroalimentan de manera dinámica durante el desarrollo de la simulación ya que son valores que varían de manera continua. Por el contrario, las otras dos entradas ('Roll rate disturbance' y 'Fin angle') se alimentan de dos bloques que producen estos dos valores, nombrados en la Figura 3-10 como 'Disturbance' y 'Control', respectivamente.

En conclusión, el conjunto que se ha desarrollado para cumplir con el objetivo de la simulación está compuesto por seis bloques, tres de ellos simulan tres barcos distintos y los otros tres definen los parámetros, sistema de control y las perturbaciones. A continuación, se adjunta el modelo de análisis de rendimiento de aletas estabilizadoras para un grado de libertad:

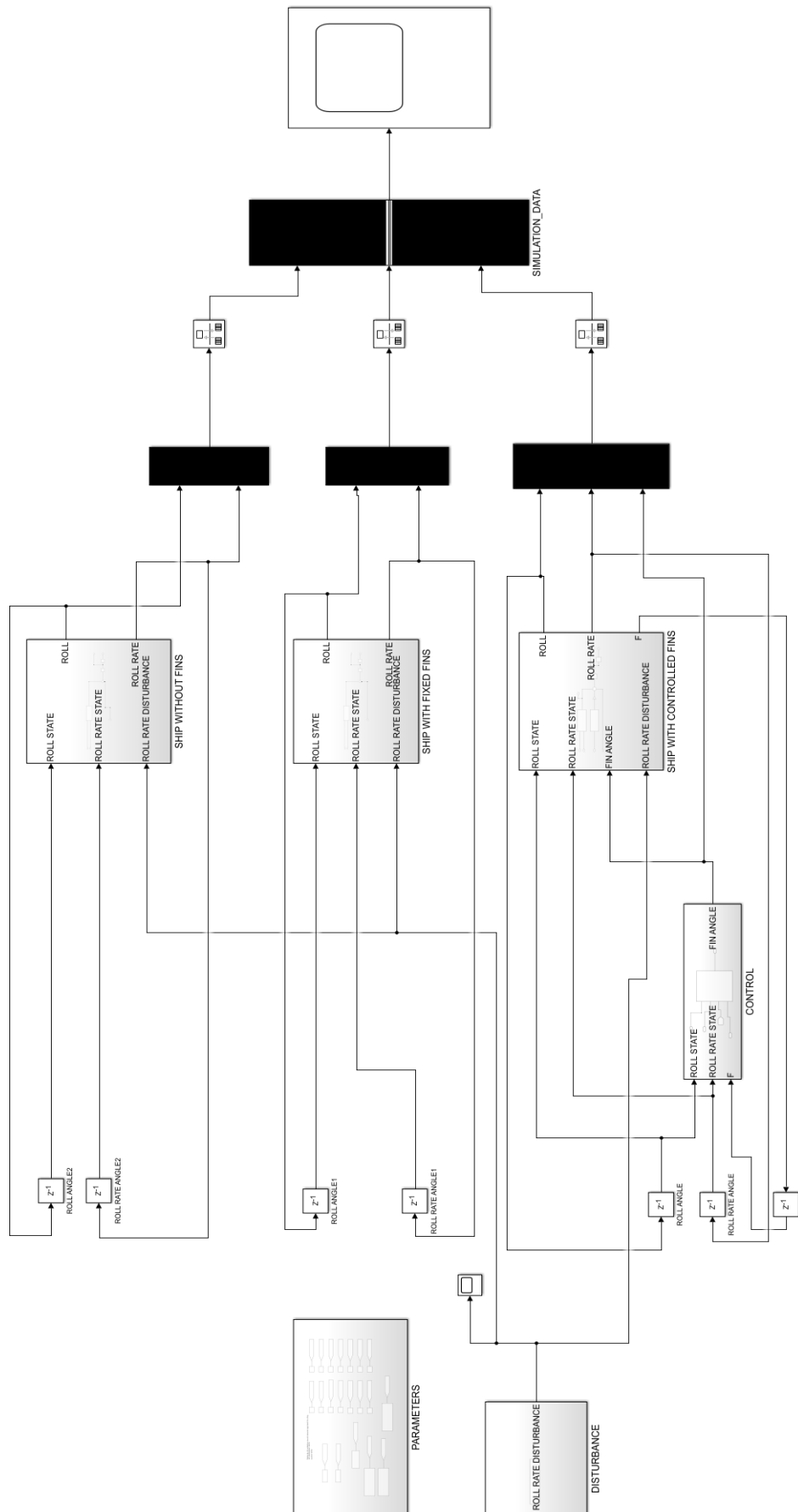


Figura 3-10 Modelo de análisis de rendimiento de aletas estabilizadoras para 1DOF [Elaboración propia]

Seguidamente se definen de manera más específica los seis bloques mostrados en la Figura 3-10:

- El primer bloque, titulado ‘Ships without fins’, se utiliza para simular un barco que no dispone de aletas estabilizadoras, para la cual se designa un valor nulo al parámetro del área de la aleta.
- El segundo bloque, titulado ‘Ship with fixed fins’, se emplea para simular un barco que tiene aletas sin un sistema de control integrado, es decir, son aletas fijas.
- El tercer bloque, titulado ‘Ship with controlled fins’, simula un barco con aletas estabilizadoras. Este bloque es el que implementa el sistema de control, y será el que permitirá comprobar el rendimiento del funcionamiento de las aletas, además del análisis de la robustez del sistema de control utilizado para establecer el movimiento de las aletas. De esta forma, se introduce el valor numérico del ángulo de incidencia de la aleta en este bloque (Figura 3-5) mediante otro subsistema que desarrolla el sistema de control.
- El bloque titulado ‘Disturbance’, implementa las perturbaciones producidas por el oleaje, desarrollado en el apartado 2.6.
- El bloque titulado ‘Control’, es el subsistema que se utiliza para implementar el código que desarrolla el sistema de control, el cual se explica en el apartado 3.3.2.3.
- Por último, el bloque titulado ‘Parameters’, se utiliza para introducir todos los parámetros necesarios para el desarrollo del modelo, los cuales se establecieron en la Tabla 3-2.

Además de los bloques definidos anteriormente, en el modelo desarrollado se han empleado otras cuatro herramientas:

- El bloque de retardo (*Delay*), se implementa al inicio del modelo. Este bloque también se emplea en el desarrollo del modelo aprendizaje (apartado 3.3.1) con la misma finalidad con la que se emplea en este modelo, emitir la entrada del bloque después de un retardo, es decir, ejecuta la acción de una memoria que en cada paso de la simulación almacena un valor para poder ser empleado en el siguiente paso. Asimismo, es importante destacar que la salida inicial del bloque depende de varios factores, como el tiempo de inicio de simulación. En definitiva, la principal ventaja que este bloque ofrece es la actualización continua de los parámetros en cambio constante debido a los requerimientos de la propia simulación dinámica.
- El bloque *Mux* (representado con un rectángulo negro) que se emplea para combinar entradas con el mismo tipo de datos y complejidad en una salida vectorial. La señal ‘Mux’ de salida es plana, incluso si se crea la señal a partir de otras señales ‘Mux’. Este tipo de señal simplifica la apariencia visual de un modelo al combinar dos o más líneas de señal en una sola línea. Además, esta herramienta no afecta a la simulación ni a la generación de código.
- El bloque de transición de velocidad (*Rate Transition*), se muestra en la Figura 3-10 a la salida de los tres primeros ‘Mux’. Este bloque permite transferir datos desde la salida de un bloque que funciona a una velocidad a la entrada de un bloque que funciona a una velocidad diferente. Utiliza los parámetros del bloque para cambiar la integridad y transferencia de los datos por una respuesta más rápida o una menor necesidad de memoria.
- Por último, el bloque *Scope* también empleado en el modelo aprendizaje, empleándose para producir los resultados de manera gráfica.

3.3.2.2 Perturbación

Como se explica en el apartado anterior, uno de los bloques que se implementa en el desarrollo del modelo en Simulink es el de la perturbación, titulado en la Figura 3-10 como ‘Disturbance’. Este bloque se define como se presenta en la Figura 3-11.

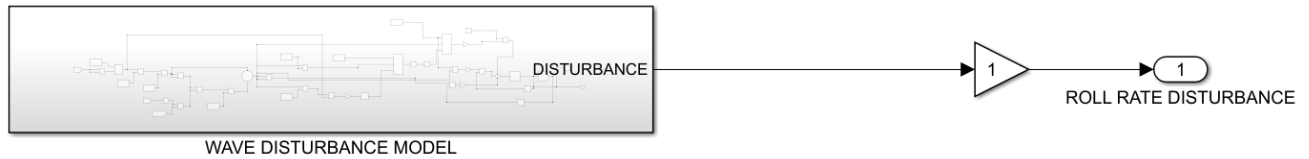


Figura 3-11 Perturbación genérica 1DOF [Elaboración propia]

donde se establece un subsistema definido como ‘Wave disturbance model’, multiplicado por una ganancia, en este caso con un valor igual a uno y obteniéndose como resultado la velocidad angular producida por las perturbaciones (Roll rate disturbance), salida que alimenta una de las entradas del modelo que simula la dinámica genérica de un barco (Figura 3-5).

El subsistema que define las perturbaciones producidas por las olas del mar se basa en el modelo matemático formulado por Pierson Jr. y Moskowitz [24], el cual se explica en el apartado 2.6. De modo que queda implementado como se muestra en la Figura 3-12.

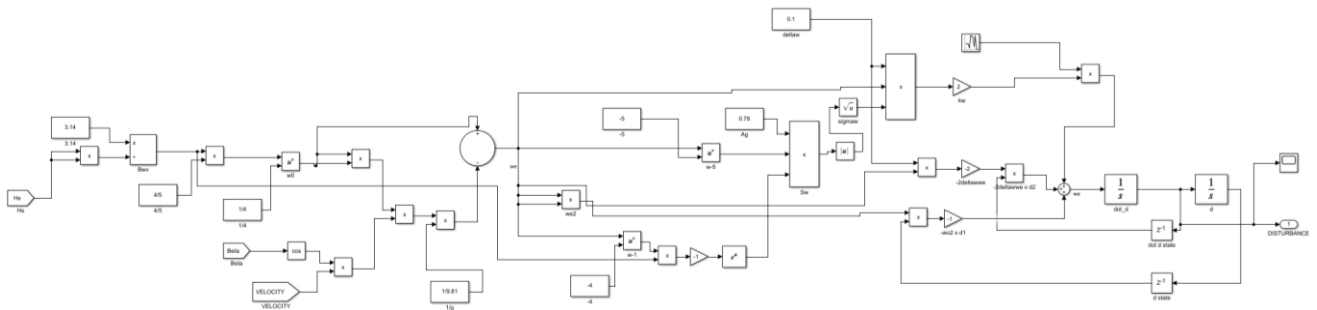


Figura 3-12 Modelo de perturbación generada por las olas [Elaboración propia]

En la Figura 3-12 se muestran un conjunto de parámetros y operadores que finalmente producen las perturbaciones (Disturbance), salida que simula las perturbaciones producidas por el oleaje. Estableciéndose la altura de la ola como parámetro variable el cual permitirá, a la hora de realizar la simulación, aumentar o disminuir la intensidad del oleaje.

3.3.2.3 Sistema de control

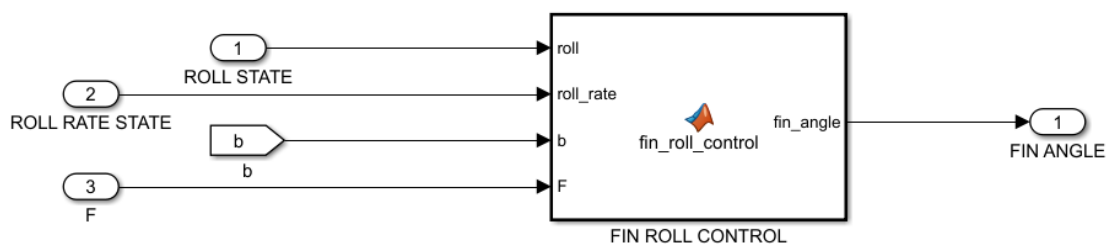


Figura 3-13 Sistema de control 1DOF [Elaboración propia]

En este bloque se implementa, en lenguaje Matlab, el código del algoritmo de control que fue presentado en el apartado 2.7.

3.4 Desarrollo del modelo con cuatro grados de libertad (4DOF)

Tras validar los resultados del sistema de control diseñado sobre el modelo 1DOF, que serán presentados en el siguiente capítulo de este TFG, se procede a iniciar la creación del modelo de 4DOF en el entorno Simulink. El modelo desarrollado se basa en el trabajo de Zhang Songtao titulado ‘L2-Gain Based Adaptive Robust Heel/Roll Reduction Control Using Fin Stabilizer during Ship Turns’ [19],

definido en el apartado 2.5. Como se comentó en ese capítulo, este modelo define la dinámica de la trayectoria y balanceo de un barco, permitiendo analizar el sistema estabilizador de aleta considerando la guiñada y el balanceo del barco, además del avance y el abatimiento. A diferencia del modelo 1DOF, en el cual se simula un barco que navega a velocidad constante en una trayectoria recta, el modelo de 4DOF es más completo, permitirá realizar un análisis mucho más realista incluyendo trayectorias curvas y con velocidades variables.

Antes de desarrollar el modelo, y para cumplir con el objetivo del trabajo es necesario establecer un valor numérico a cada uno de los parámetros que componen el modelo de 4DOF. Los parámetros del buque, la aleta y el timón se muestran en la Tabla 3-3 y Tabla 3-4, respectivamente. El ángulo de la aleta que permite rotar el buque a babor se define como el ángulo positivo de la aleta, por otro lado, el ángulo del timón que hace girar el barco hacia la izquierda se define como el ángulo positivo del timón. La densidad del agua es 1025 Kg/m^3 (ρ), los coeficientes hidrodinámicos presentados en el apartado 2.5.1 se muestran en la Tabla 3-5, donde m es la masa del barco y Δ es la flotabilidad del barco. A continuación, se presentan todos los parámetros utilizados en el desarrollo del modelo:

Descripción	Valor	Unidad
Lenght between perpendiculars	51.5	m
Beam overall	8.6	m
Draft	2.3	m
Displacement	357	m^3
Transverse metacentric height	1.1	m
Roll inertia	2.38×10^6	$\text{Kg } m^2$
Yaw inertia	4.79×10^7	$\text{Kg } m^2$
Coordinates of center of gravity	(-3.38, 0, -1.06)	m

Tabla 3-3 Parámetros del barco [19]

Descripción	Aleta	Timón	Unidad
Area	16 x 2	1.5 x 2	m^2
Aspect ratio	1	1.5	-
Max. angle of attack	25	35	°
Max. turning rate	15	10	°/s
Roll arm	4.22	3.3	m
Yaw arm	-2	20.4	m
Lift coefficient	0.042	0.044	/°
Tilt angle	34	90	°

Tabla 3-4 Parámetros de la aleta y del timón [19]

Subíndices	X	Y	K	N
$\dot{u}$	-1.754×10^4	0	0	0
$\dot{v}$	0	-1.90×10^6	2.96×10^5	5.38×10^5
$\dot{p}$	0	-2.96×10^5	-6.74×10^5	0
$\dot{r}$	0	-1.40×10^6	0	-4.40×10^7
$u u $	-1.96×10^3	0	0	0
$ u v$	0	-1.18×10^4	9.26×10^3	-9.20×10^4
$ u r$	0	1.31×10^5	-1.02×10^5	-4.71×10^6
$v v $	0	-3.70×10^3	2.93×10^4	0
$ r r$	0	0	0	-2.02×10^8
$ v r$	0.33 x m	-7.94×10^5	6.21×10^5	0
$r v $	0	-1.82×10^5	1.42×10^5	-1.56×10^7
$\varphi uv $	0	-1.08×10^4	-8.40×10^3	-2.14×10^5
$\varphi ur $	0	-2.51×10^5	-1.96×10^5	-4.98×10^6
φuu	0	-7.40×10^1	-1.18×10^3	-8.00×10^3
$ u p$	0	0	-1.55×10^4	0
$ p p$	0	0	-4.16×10^5	0
p	0	0	-5.00×10^5	0
$\varphi\varphi\varphi$	0	0	-0.325Δ	0

Tabla 3-5 Coeficientes hidrodinámicos [19]

A continuación, se muestra el modelo desarrollado en Simulink.

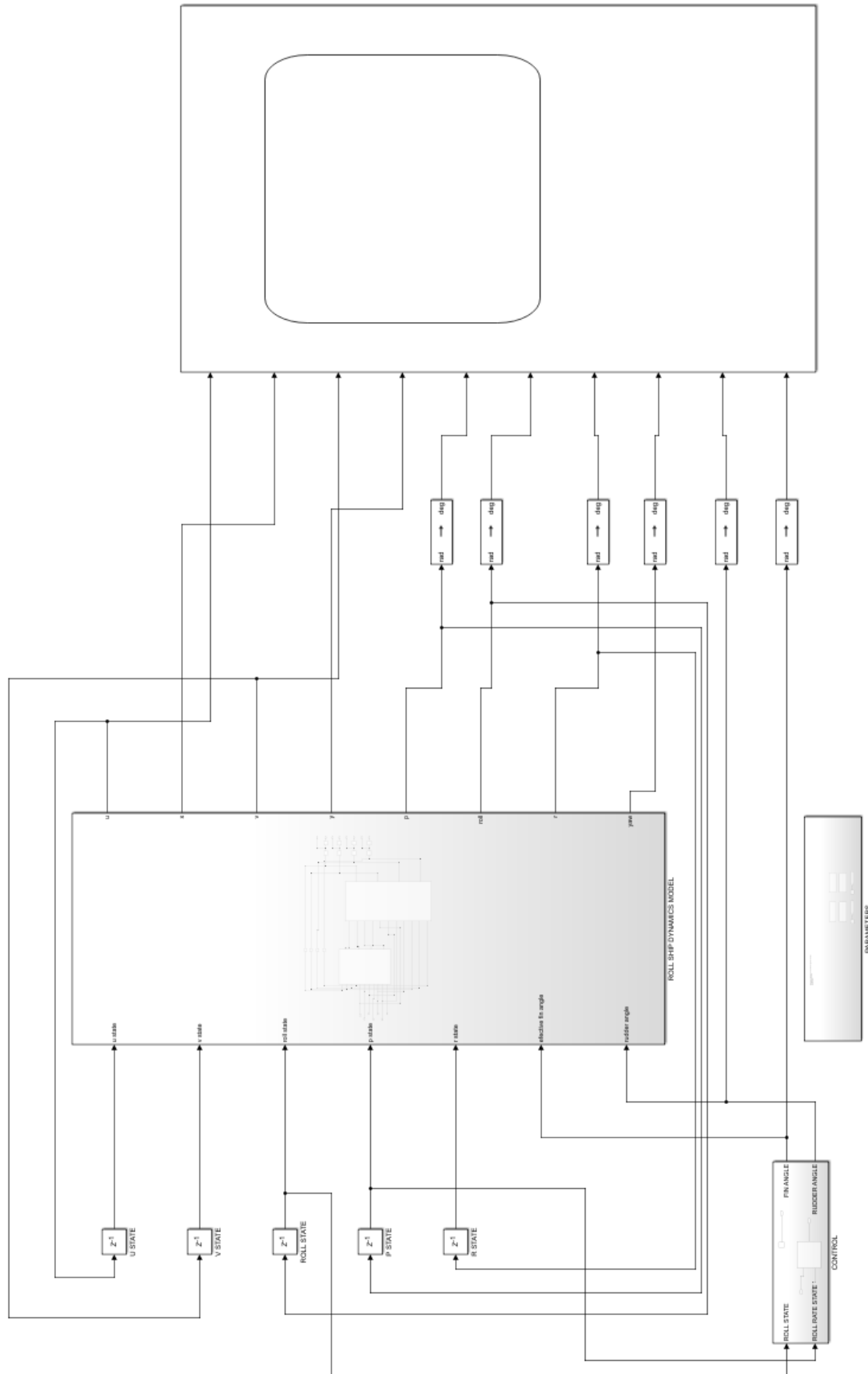


Figura 3-14 Modelo de simulación de un barco con sistema de control en 4DOF [Elaboración propia]

La Figura 3-14 presenta una vista general del modelo 4DOF desarrollado en Simulink. Así como se realizó en el modelo 1DOF, en este modelo se establece un bloque de parámetros (Parameters), uno que implementa el sistema de control del buque (Control) y uno que define la dinámica de balanceo del barco (Roll ship dynamics). Además, se emplea la herramienta *Angle conversion* para pasar los resultados de radianes a grados antes de introducirse en el bloque *Scope*, el cual permite al usuario observar las gráficas que definen el movimiento que experimenta el barco. Seguidamente se desarrollan los tres bloques definidos anteriormente.

3.4.1 Subsistema: Roll ship dynamics

El bloque Roll ship dynamics se emplea para definir la dinámica de balanceo y trayectoria del barco explicada en el apartado 2.5. A continuación, se muestra el bloque de manera genérica.

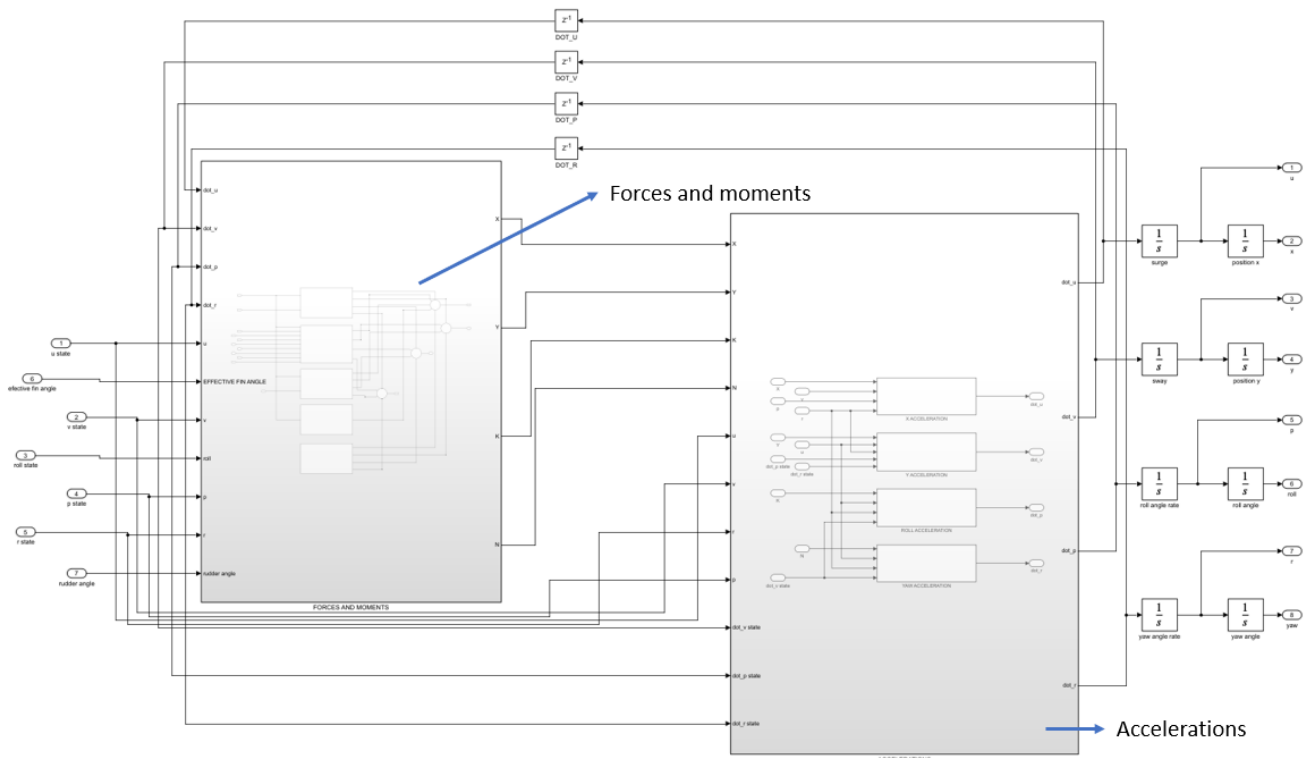


Figura 3-15 Dinámica de un barco definida por Zhang Songtao [Elaboración propia]

A la hora de desarrollar este modelo se plantearon diferentes formatos debido al gran número de variables y de ecuaciones que presentaba. Finalmente se desarrolla un esquema numérico el cual define de manera directa lo que se muestra en la Figura 3-15.

Aceleraciones	Fuerzas y momentos
$X = m(\dot{u} - vr - X_G r^2 + Z_G pr) =$	$X_{FIN} + X_{HYD} + X_{RUD} + X_{PRO}$
$Y = m(\dot{v} + ur - Z_G \dot{p} + X_G \dot{r}) =$	$Y_{FIN} + Y_{HYD} + Y_{RUD} + Y_{PRO}$
$K = I_x \dot{p} - mZ_G(\dot{v} + ur) =$	$K_{FIN} + K_{HYD} + K_{RUD} + K_{PRO}$
$N = I_z \dot{r} + mX_G(\dot{v} + ur) =$	$N_{FIN} + N_{HYD} + N_{RUD} + N_{PRO}$

Tabla 3-6 Esquema numérico implementado en Simulink

Tras desarrollar las expresiones genéricas, y como se muestra en la Figura 3-15 se decide emplear dos subsistemas, titulados 'Accelerations' y 'Force and moments', definidas en la Tabla 3-6. La finalidad

de este bloque es obtener la aceleración de la velocidad lineal ($\dot{u}$), del abatimiento ($\dot{v}$), del balanceo ($\dot{p}$) y de la guiñada ($\dot{r}$). Seguidamente, se realiza el mismo método empleado en el modelo de 1DOF, implementando la función de integración la cual permite calcular los valores de posición y de ángulos que se necesitan para obtener el estado de equilibrio del barco. A continuación, se definen los dos subsistemas mostrados en la Figura 3-15.

3.4.1.1 Subsistema: Forces and moments

En este apartado se explicará el desarrollo del bloque que desarrolla las fuerzas y momentos que experimenta el barco debido a su las aletas (apartado 2.5.2), hidrodinámica (apartado 2.5.1), el timón (apartado 2.5.3) y la hélice (apartado 2.5.4).

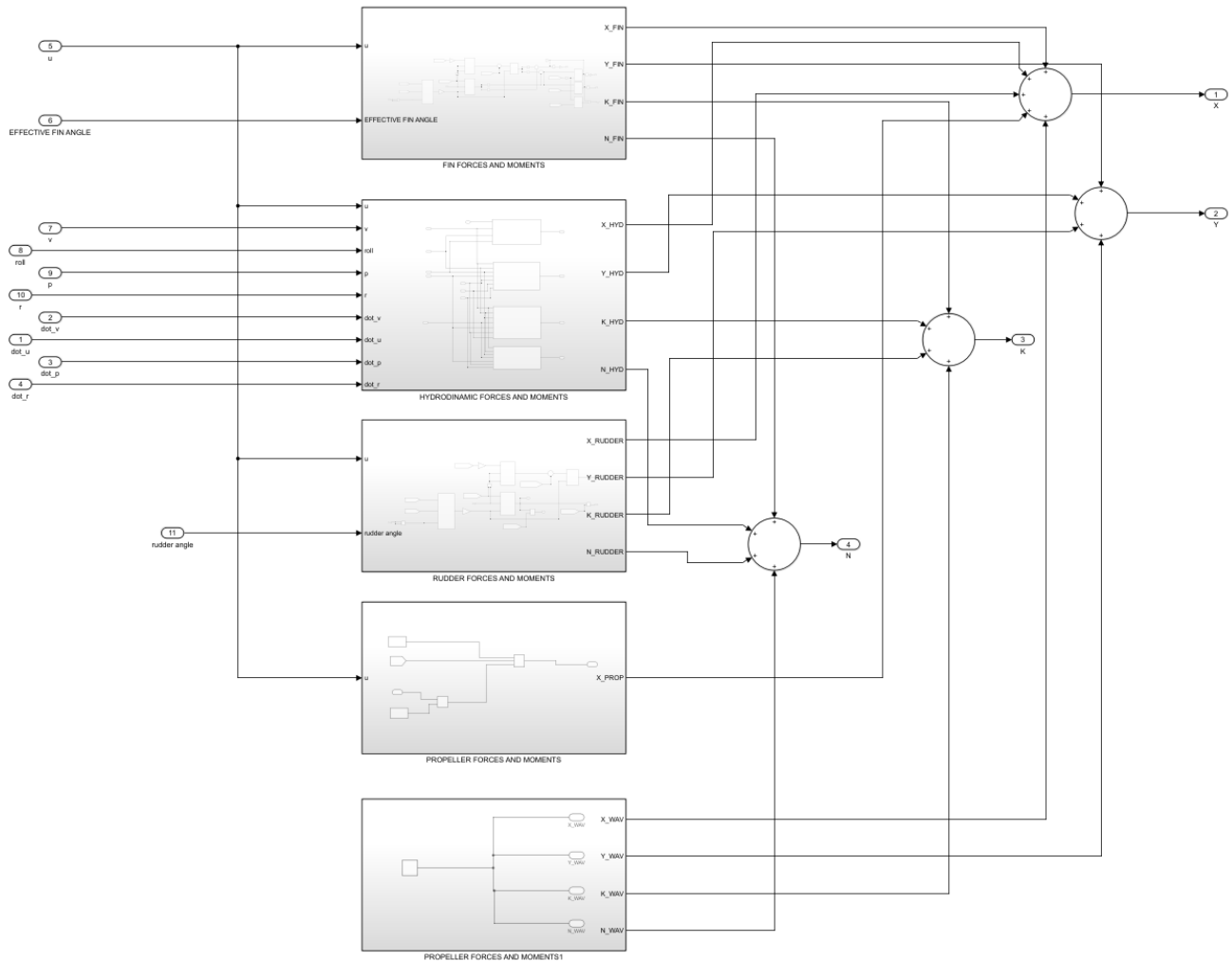


Figura 3-16 Fuerzas y momentos 4DOF [Elaboración propia]

En la Figura 3-16 se presenta el subsistema que desarrolla las fuerzas y momentos para este modelo, el cual se divide en cinco bloques, los cuales desarrollan las fuerzas y momentos respectivamente.

Adicionalmente, se añade un quinto bloque que se emplea para implementar el valor nulo de los parámetros Y_{PRO} , K_{PRO} y N_{PRO} definidos en el apartado 2.5.4. A continuación, se mostrarán los cuatro bloques empleados para obtener las fuerzas longitudinales en la dirección x, es decir, X.

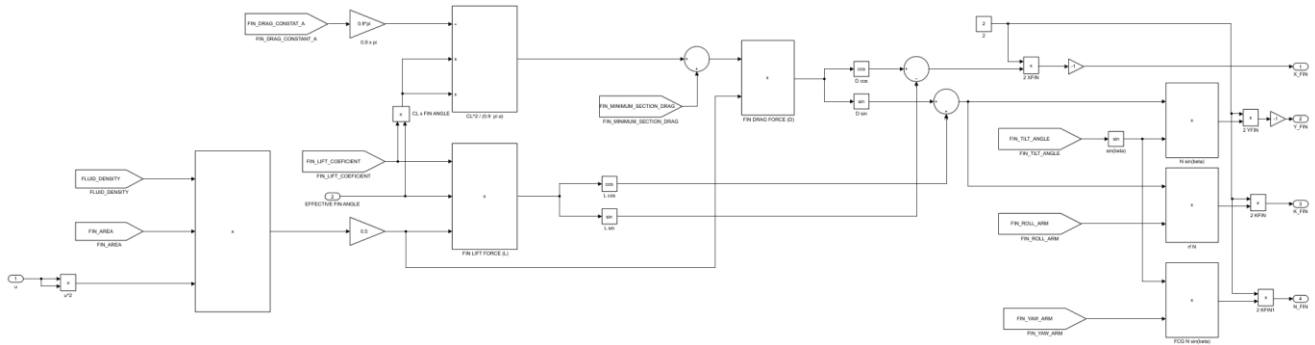


Figura 3-17 Fuerzas y momentos de la aleta [Elaboración propia]

El subsistema que se muestra en la Figura 3-17 desarrolla las fuerzas y momentos generados por la aleta en el barco, del cual se obtienen los cuatro valores de fuerzas y momentos correspondientes. De igual forma, para el subsistema que se muestra en la Figura 3-18 se han realizado bloques independientes para cada fuerza y momento hidrodinámico en función de cada una de las cuatro variables del modelo 4DOF.

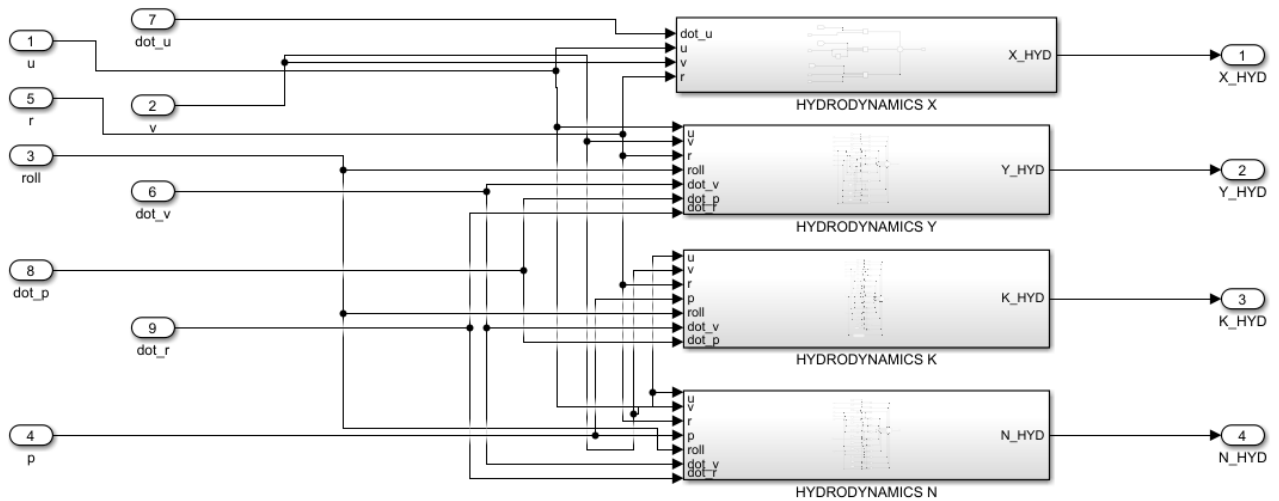


Figura 3-18 Fuerzas y momentos hidrodinámicos [Elaboración propia]

Más concretamente, el subsistema que desarrolla la hidrodinámica que experimenta el barco respecto a X es el siguiente.

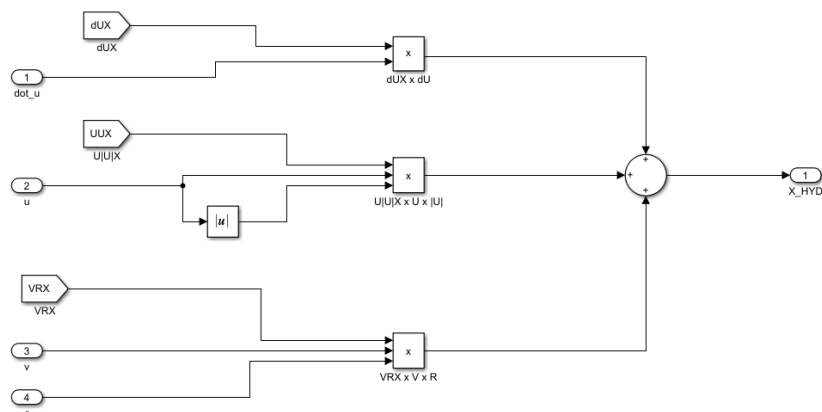


Figura 3-19 Fuerzas y momentos hidrodinámicos en X [Elaboración propia]

De la misma forma que se muestra en la Figura 3-19, se desarrolla la hidrodinámica en Y_{HYD} , K_{HYD} y N_{HYD} implementando, en el subsistema correspondiente, las expresiones definidas en el apartado 2.5.1.

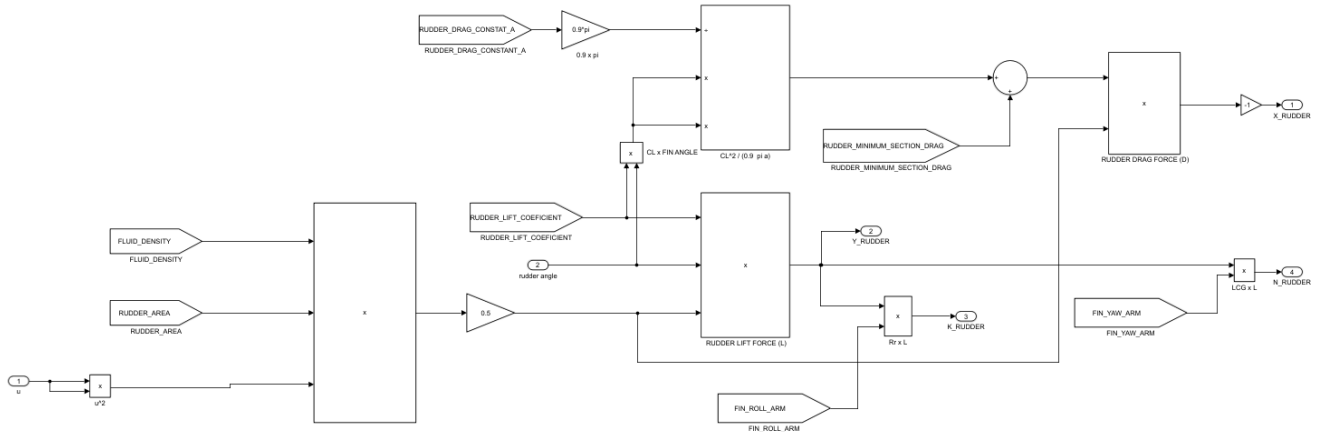


Figura 3-20 Fuerzas y momentos del timón [Elaboración propia]

Seguidamente y como se establece en el bloque que define las fuerzas y momentos de la aleta, se desarrolla el subsistema de fuerzas y momentos del timón, representado en la Figura 3-20, en donde se obtiene los cuatro valores correspondientes a las fuerzas producidas por el timón.

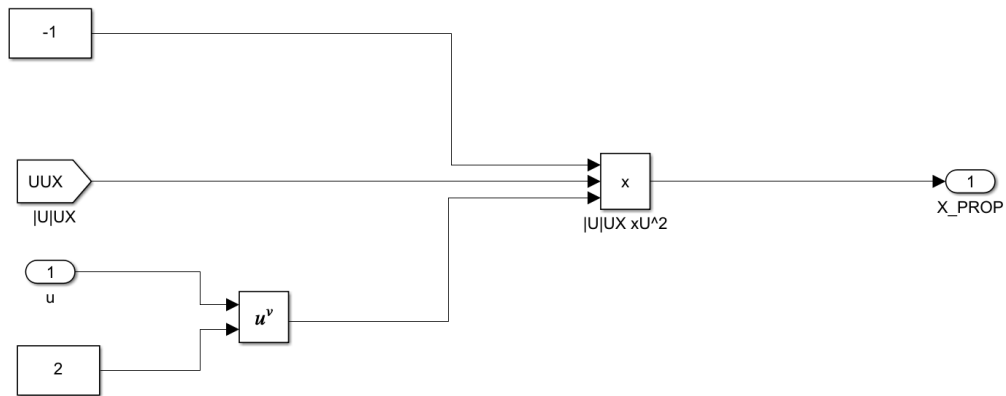


Figura 3-21 Fuerzas y momentos de la hélice en X [Elaboración propia]

Por último, para obtener las fuerzas y momentos que experimenta el barco debido a la hélice respecto a la dirección x, se establece el bloque mostrado en la Figura 3-21. Para el resto de los parámetros que definen las fuerzas producidas por la hélice en el resto de los ejes se desarrolla un bloque que produce un valor nulo, siendo este el último bloque que se muestra en la Figura 3-17.

3.4.1.2 Subsistema: Accelerations

Por otro lado, el subsistema que se emplea para implementar las expresiones definidas en la columna de 'Accelerations' de la Tabla 3-6 en el modelo desarrollado en Simulink, es el que se titula 'Accelerations' de la Figura 3-15.

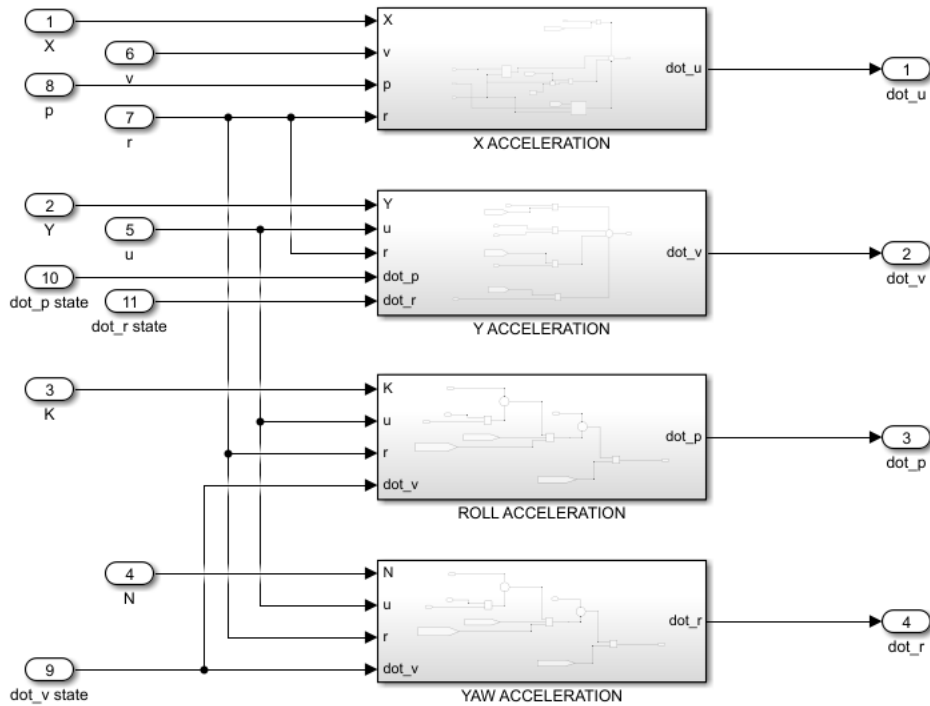


Figura 3-22 Aceleraciones 4DOF [Elaboración propia]

De la misma forma que se ha desarrollado el bloque de fuerzas y momentos y como se muestra en la Figura 3-22, se establece el bloque de aceleraciones, dividiendo el bloque en cuatro subsistemas que definen las cuatro aceleraciones que experimenta el barco de estudio en 4DOF. A continuación, se muestra el subsistema definido para la aceleración lineal en el eje x.

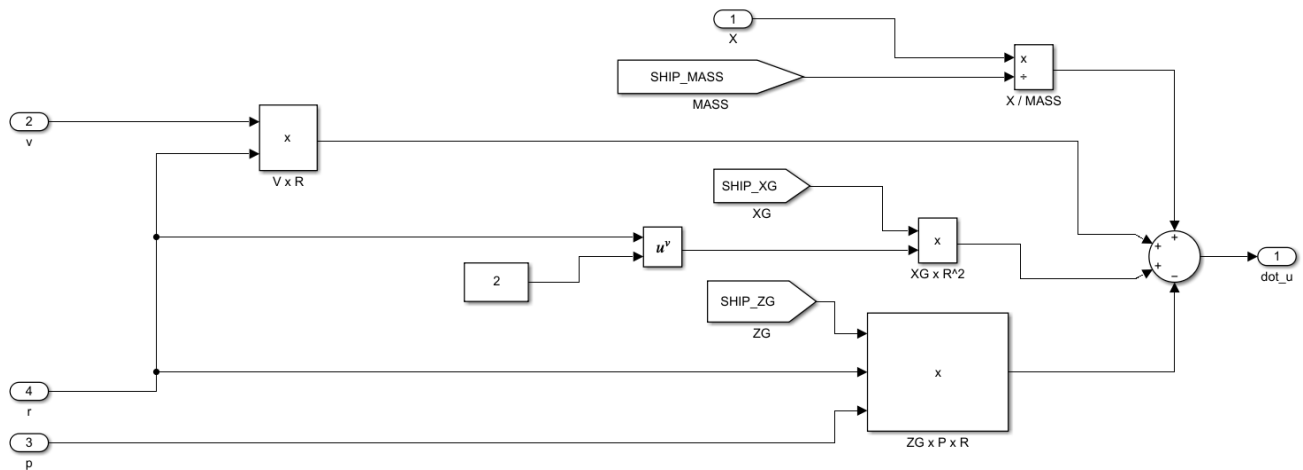


Figura 3-23 Aceleración en X [Elaboración propia]

La Figura 3-23 define la expresión por medio de la cual se obtienen la aceleración lineal en el eje x, la cual viene definida en la Tabla 3-6, de forma que, a la hora de despejar la aceleración, la expresión que se obtiene para implementar en este bloque se define con la Ecuación 3-5.

$$\dot{u} = \frac{X}{m} + vr + X_G r^2 - Z_G pr$$

Ecuación 3-5

Asimismo, se desarrollan la aceleración lineal en el eje y, así como las aceleraciones angulares de balanceo y guiñada, definiéndose en los otros tres bloques respectivamente.

Tras definir la dinámica de trayectoria y balanceo experimentada por un barco en 4DOF, se procede a definir los dos subsistemas restantes, definidos en la Figura 3-14.

3.4.2 Subsistema: Control

El sistema de control integrado en la aleta se define por el mismo medio con el que se desarrolló el modelo 1DOF, quedando implementado de la siguiente forma.

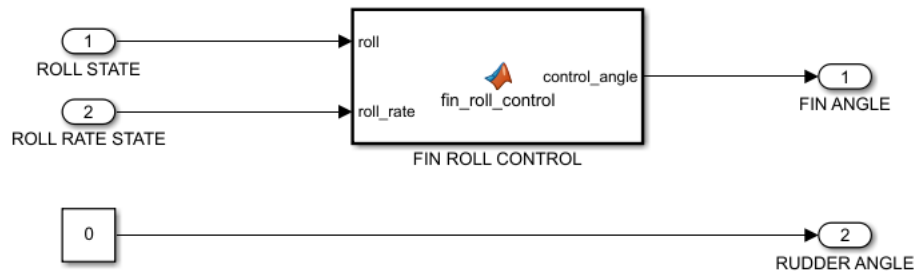


Figura 3-24 Sistema de control 4DOF [Elaboración propia]

En la Figura 3-24 se muestra el modelo integrado para la estabilización del buque, implementando en el bloque 'Fin roll control' el algoritmo de control. Además, a diferencia del bloque 1DOF, se implementa un sistema que implementa el ángulo del timón, el cual define la trayectoria del barco.

3.4.3 Subsistema: Parameters

Por último, se muestra en la Figura 3-25, donde se establecen todos los parámetros empleados en el desarrollo del modelo de simulación de un barco con sistema de control en 4DOF.

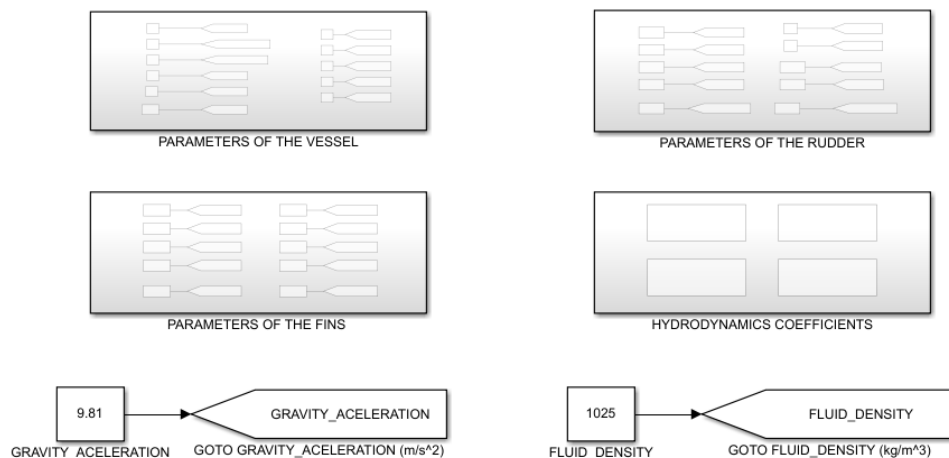


Figura 3-25 Parámetros 4DOF [Elaboración propia]

Este bloque se divide en cuatro subsistemas, los cuales definen los parámetros definidos por Zhang Songtao en su trabajo [19], y establecidas en las tablas añadidas al inicio de este capítulo, quedando distribuidas de la siguiente forma:

- Parámetros del barco (Tabla 3-3).
- Parámetros de la aleta (Tabla 3-4).
- Parámetros del timón (Tabla 3-4).
- Parámetros hidrodinámicos (Tabla 3-5).
- Gravedad y densidad del agua.

Por último, y a modo de ejemplo, se muestra en la Figura 3-26 el subsistema que define los parámetros de la aleta.

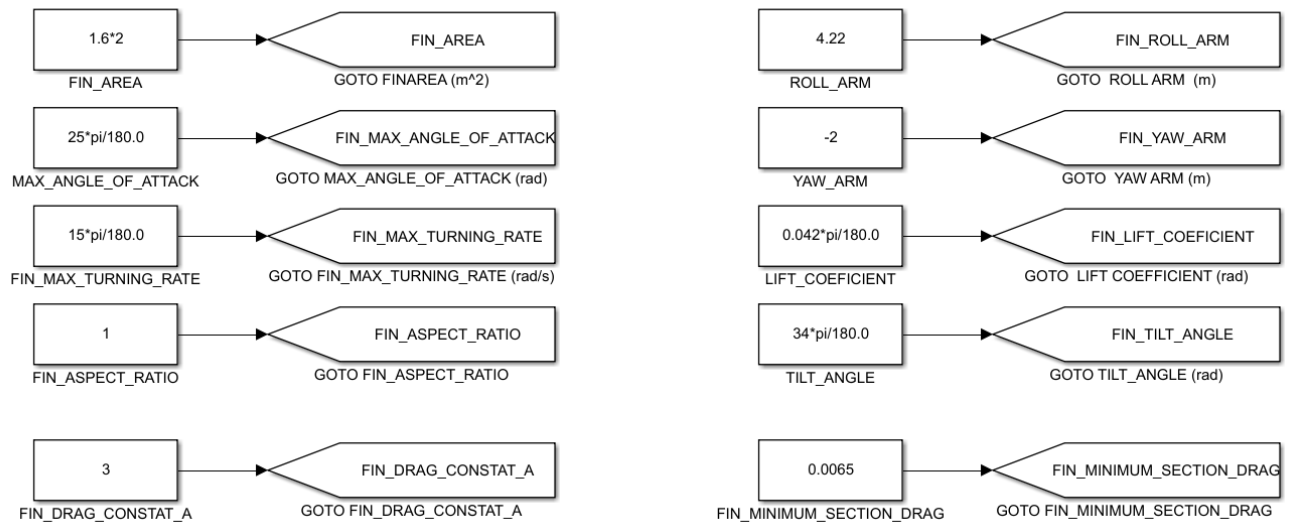


Figura 3-26 Parámetros de la aleta 4DOF [Elaboración propia]

4 PRUEBA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se realizan una serie de simulaciones con la finalidad de obtener un conjunto de resultados que permitan analizar el funcionamiento de la herramienta diseñada. En primer lugar, se realiza el análisis del modelo 1DOF, se definen una serie de parámetros clave, los cuales se modifican en función del estudio deseado, cambiando el entorno en el que navegará el barco. La herramienta de simulación genera unos gráficos que permiten desarrollar el análisis del algoritmo de control en función del rendimiento del barco con el sistema de estabilización integrado. Por otra parte, no ha sido posible finalizar las pruebas del modelo de 4DOF para poder ser integrados en este TFG.

4.2 Análisis del modelo de un grado de libertad (1DOF)

Tras la explicación de la implementación en Matlab/Simulink del modelo de un grado de libertad desarrollado por I. Abdulrasheed Jimoh [28] en el apartado 3.3.2, se va a realizar el análisis del rendimiento de las aletas como sistema de control de estabilización, así como de la robustez del sistema de control. Además, el programa diseñado se ejecuta de manera dinámica durante un tiempo determinado, produciendo unas gráficas variables (siendo el tiempo de simulación de 200 segundos), por lo que permite observar la actuación del movimiento del buque a medida que las perturbaciones afectan a la plataforma. El análisis se realizará modificando tres parámetros, los cuales afectan directamente a la estabilidad del buque. Los parámetros seleccionados que establecen los cambios en los escenarios propuestos son: son el área de la aleta, el ángulo de encuentro con el oleaje y la altura de la ola.

Por un lado, uno de los estudios que se va a realizar en el análisis es el rendimiento de la aleta, es decir, este programa simulará la respuesta respecto a la estabilidad de un barco en función de una serie de perturbaciones. Cada uno de estos barcos tiene unas características diferentes, el primer barco sin aletas, el segundo barco con aletas sin sistema de control integrado y el tercer barco con aletas con sistema de control integrado. De esta manera se podrán comparar los resultados respecto al ángulo del balanceo de cada uno de los barcos.

Por otro lado, el estudio que se va a realizar es respecto a la robustez del sistema de control. La robustez de un sistema de control mide la capacidad de adaptación que le permite hacer frente a una serie de incertidumbres y perturbaciones exteriores de forma que se mantiene la respuesta deseada con independencia de la presencia de estos términos que alteran el comportamiento dinámico nominal.

4.2.1 Parámetros iniciales

A continuación, y como se estableció en el modelo desarrollado por Isah Abdulrasheed Jimoh [28], explicado en el apartado 3.3.2, para el funcionamiento de esta herramienta de simulación se deben introducir una serie de parámetros iniciales que describen las características generales del barco que se va a simular. Los parámetros iniciales establecidos son lo que desarrolla Ronghui Li [30] en su trabajo, y se muestran en la Tabla 4-1:

Parámetros			
ϕ	Ángulo de balanceo (rad)	T	21120000 kg
$\dot{\phi}$	Velocidad de balanceo (rad/s)	h	1 m
$\ddot{\phi}$	Aceleración de balanceo (rad/s ²)	ϕ_v	0.75 rad
α	Ángulo de la aleta (rad)	n_1	0.031
ρ	1025 kg/m ³	n_2	0.0152
U	7.72 m/s	B_s	25.4 m
A_f	25 m ²	g	9.81 m/s ²
l_f	3 m	L	175 m
C_L^α	3.39	d	8.5 m

Tabla 4-1 Parámetros del barco del modelo Ronghui Li [30]

A estos parámetros, que son los que se establecen en el desarrollo de modelo de Simulink, hay que añadir el parámetro de altura de la ola (h_w), el cual se establece en el modelo desarrollado en el apartado 2.6 y va incluido en el bloque de perturbaciones de Simulink. Como se indicó anteriormente, la mayor parte de los parámetros se van a mantener constantes durante el estudio, a excepción del área de la aleta (A_f), el ángulo de encuentro entre el barco y el oleaje (β) y la altura de la ola (h_w). De esta forma, estos tres valores se modificarán con la finalidad de observar el comportamiento de barco y del algoritmo de control en función de las respuestas obtenidas.

Parámetros	
A_f	25 m ²
β	90°
h_w	2.5 m

Tabla 4-2 Parámetros iniciales (Caso 1)

4.2.1.1 Resultado para parámetros iniciales

A continuación, se va a ejecutar el programa con el objetivo de obtener dos figuras en las cuales se representan unos gráficos que ofrecen el resultado del movimiento de balanceo y su posterior corrección al balanceo debido al sistema estabilizador. Esta representación viene reflejada por tres líneas de tres colores (como viene expresado en la leyenda de cada figura) en la que cada una de ellas simula el movimiento de uno de los barcos, siguiendo el siguiente patrón de colores:

- La línea negra representa el movimiento del barco sin aletas estabilizadoras.

- La línea roja representa el movimiento del barco con aletas estabilizadoras sin sistema de control integrado.
- La línea azul representa el movimiento del barco con aletas estabilizadoras con sistemas de control integrado.

Este patrón de colores será el que seguirán todos los gráficos que se analizarán en esta memoria. En consecuencia, se ejecuta el programa con los parámetros modificables establecidos en la Tabla 4-2 y cuando la simulación llega al final, es decir, cuando cumple el periodo de tiempo establecido (en este caso de 200 segundos) se obtienen los siguientes gráficos (Figura 4-1 y Figura 4-2):

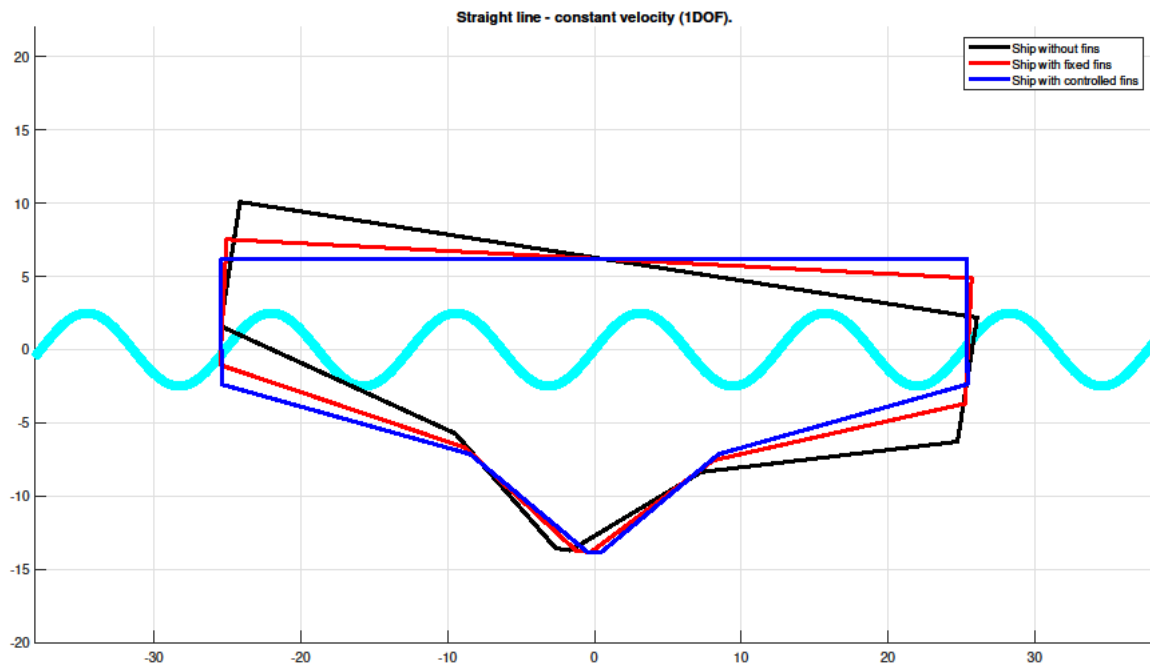


Figura 4-1 Corte transversal (Caso 1) [Elaboración propia]

En la Figura 4-1 se ve reflejado un corte transversal de los tres barcos, es decir, tres siluetas superpuestas con los colores establecidos anteriormente. Además, se observa una línea azul turquesa que representa una función de un seno a escala, simulando la perturbación de la ola. Esto permite realizar un análisis superficial del comportamiento del barco en función de sus características, observándose el ángulo de balanceo del buque.

Para el caso 1, de la Figura 4-1 se analiza que tanto el barco con aletas sin sistema de control integrado como el barco sin aletas permanecen fuera de la posición de equilibrio deseada en el segundo 200, por el contrario, el barco con aletas con sistema de control integrado permanece estable. Además, para este momento (segundo 200) el barco que mayor escora presenta es el que tiene aletas sin sistema de control, pero debido a que este gráfico aporta información para un momento exacto y no permite analizar el comportamiento del barco a lo largo del tiempo, se adjunta otros tres gráficos que se obtienen al ejecutar el programa.

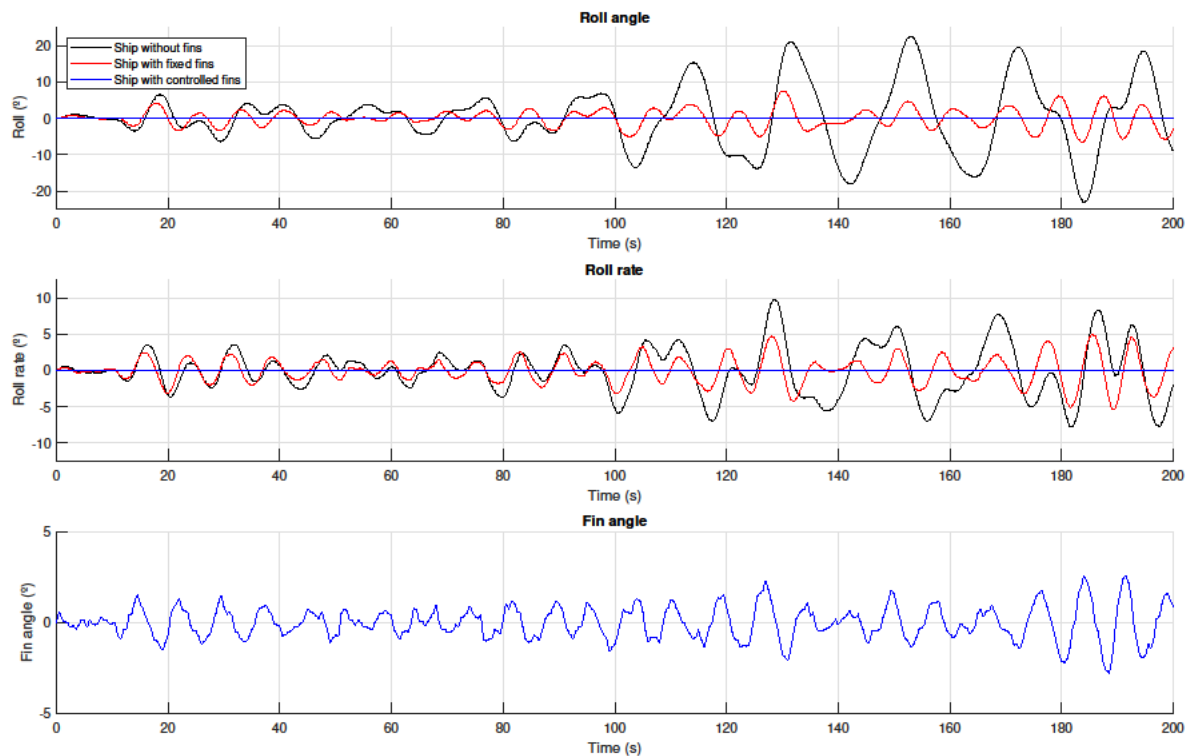


Figura 4-2 Funciones de balanceo (Caso 1) [Elaboración propia]

La Figura 4-2 muestra tres gráficos respecto al tiempo, en las que se representa el ángulo de balanceo, titulado 'Roll angle' ($^{\circ}$); la velocidad de balanceo, titulado 'Roll rate' ($^{\circ}/s$); y el ángulo efectivo de la aleta, titulado 'Fin angle' ($^{\circ}$), respectivamente. De la misma forma que se establece en la anterior figura (Figura 4-1), se sigue trabajando con el mismo código de colores, a excepción del tercer gráfico que solo muestra el ángulo que describe la aleta del barco con aletas con sistema de control integrado.

En cuanto al estudio del comportamiento de los tres barcos, se diferencia dos tendencias claras.

1. El primero de ellos es cuando el barco no dispone de sistema de control de estabilización, ya sea con aletas o sin aletas, lo cual provoca que durante el tiempo de simulación el ángulo de balanceo presenta oscilaciones importantes, aunque hay que destacar que son de orden superior en el barco que no dispone de ningún tipo de aleta estabilizadora. Además, se observa una tendencia de aumento del ángulo de escora a medida que avanza el tiempo, alcanzado el máximo ángulo de escora para el barco sin aletas en el segundo 184, de 23.21° a babor y para el barco con aletas sin sistema de control de 7.48° a babor en el segundo 130.5.
2. Por el contrario, se observa que el barco con aletas con sistema de control integrado responde correctamente a las perturbaciones a la que es sometido, manteniéndose de manera estable durante toda la simulación. El sistema de control que lleva integrado la aleta, modifica su ángulo de incidencia en función de la escora que vaya a recibir el barco, alcanzando un ángulo máximo de 2.77° en el segundo 188.5. Estos valores tan pequeños de ángulo de control se deben a que se ha sobredimensionado el tamaño de la aleta, lo cual provoca una menor necesidad de movimiento para lograr los pares de control necesarios para estabilizar el balanceo del barco.

En conclusión, después de observar el comportamiento de los tres barcos tras la primera simulación, se puede observar que el algoritmo de control responde con el comportamiento esperado, siendo el único barco que navega de manera estable el que tiene aletas con sistema de control integrado y siendo el que mayor escora presenta el que no tiene aletas. Asimismo, se analiza que las aletas sin sistema de control integrado aumentan la estabilidad del buque ya que producen una resistencia al agua cuando el barco se

ve sometido a distintas perturbaciones. A continuación, se modificará el tamaño de la aleta y se analizará si el sistema responde de manera adecuada.

4.2.2 Análisis para distintos tamaños de aleta

En este apartado se realizarán dos simulaciones, estableciéndose un aumento y una disminución del tamaño de la aleta. De tal forma, que se espera que, con un aumento del tamaño de la aleta disminuya el ángulo de incidencia de la aleta debido a la capacidad de desplazamiento de agua que tiene, por el contrario, si se disminuye el tamaño de la aleta aumentará el ángulo de incidencia para generar una mayor fuerza de contrabalanceo sobre el barco. A continuación, se establecen los nuevos datos para las siguientes simulaciones:

Parámetros	Caso 2	Caso 3
A_f	5 m^2	50 m^2
β	90°	90°
h_w	2.5 m	2.5 m

Tabla 4-3 Parámetros para simulación con cambio de tamaño de aleta

En primer lugar, se realiza la simulación para el caso 2, donde se ha disminuido el tamaño de la aleta a 5 m^2 .

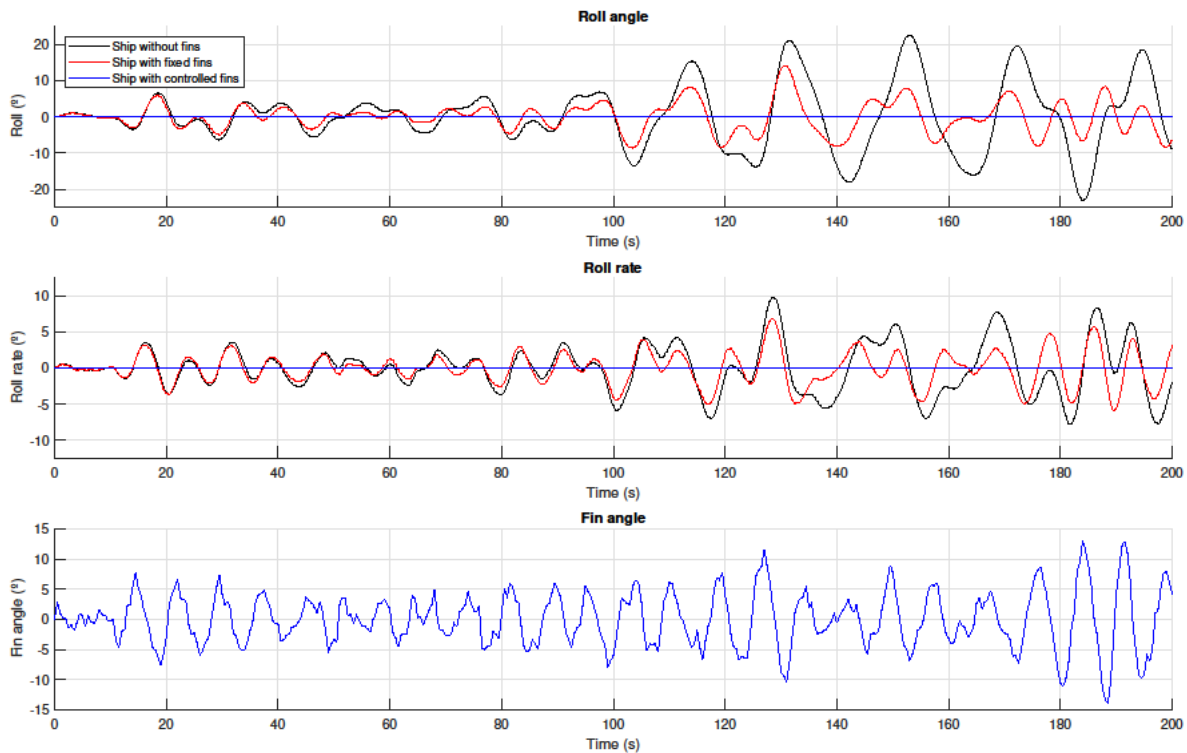


Figura 4-3 Funciones de balanceo (Caso 2) [Elaboración propia]

Tras la ejecución del programa para este tamaño de aleta se obtiene la Figura 4-3, en la que se presenta el movimiento del barco frente a las perturbaciones. Respecto al comportamiento de los tres barcos frente a las perturbaciones, se observa que todos ellos responde de la manera esperada, el barco sin aletas presenta la misma función que para el caso 1 (apartado 4.2.1.1); el barco con aletas sin sistema de control presenta un movimiento de balanceo más exagerado que en el caso 1, esto es debido a que el tamaño de la aleta es menor y en consecuencia la resistencia que genera al movimiento de balanceo

también lo es, llegando a alcanzar un ángulo máximo de 14.03° en el segundo 131. Por último, el barco con aletas con sistema de control se mantiene estable durante toda la simulación, destacándose un mayor ángulo de incidencia de la aleta el cual llega a alcanzar un valor de 13.87° en el segundo 188.5.

A continuación, se realiza la simulación para el caso 3, donde se ha aumentado el tamaño de la aleta a 50 m^2 .

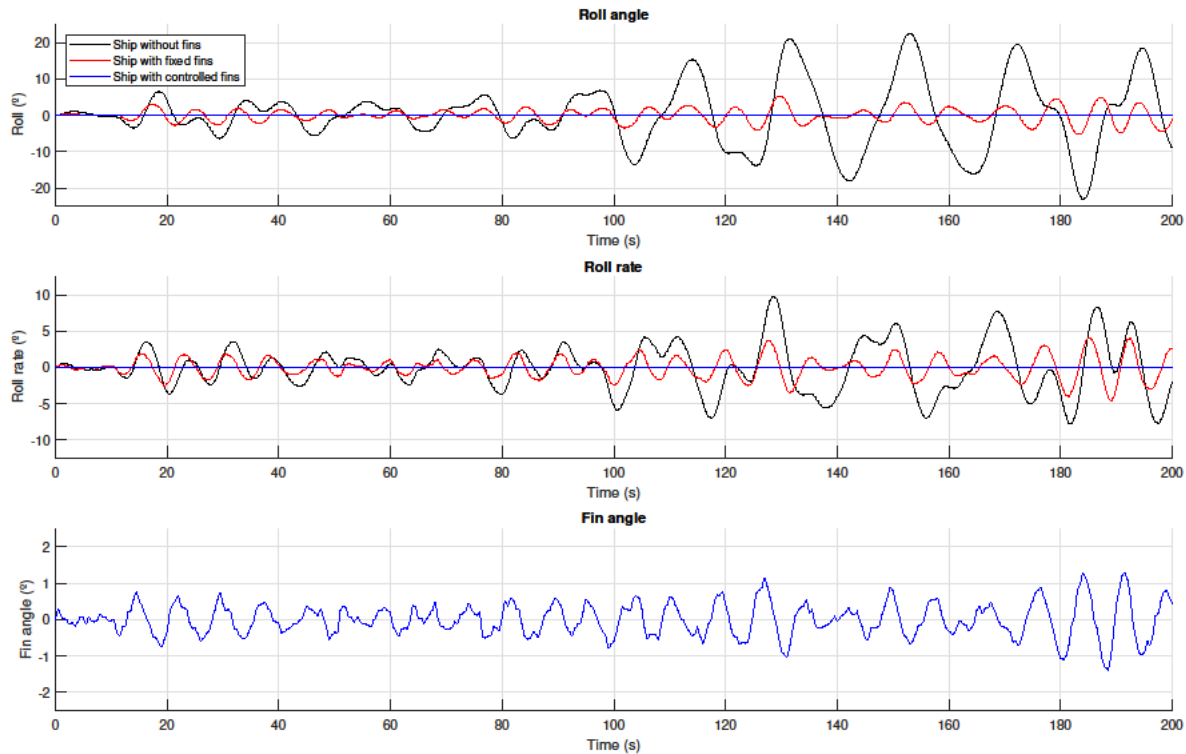


Figura 4-4 Funciones de balanceo (Caso 3) [Elaboración propia]

De la misma forma que en el caso 2, en la Figura 4-4 se observa que para esta simulación el movimiento de balanceo que presenta el barco sin aletas es el mismo que sufre en el apartado 4.2.1.1; en segundo lugar, a diferencia del caso 2 el movimiento de balanceo que experimenta el barco con aletas sin sistema de control es menor ya que el tamaño de las aletas es mayor y en consecuencia la resistencia que generan al balanceo es mayor, produciendo una mayor estabilidad al buque y llegando a alcanzar un ángulo máximo de balanceo de 5.29° a estribor en el segundo 130. Finalmente, el barco con aletas con sistema de control sigue respondiendo de manera correcta a las perturbaciones. Es importante destacar que a diferencia que en el caso 2, como el área de la aleta es mayor el ángulo de incidencia disminuye alcanzando su máximo en el segundo 188.5 de 1.39° .

La conclusión que se obtiene de estas dos simulaciones realizando un cambio de tamaño de la aleta es que el sistema de control responde de manera correcta a las perturbaciones. Lo que significa que el programa que simula el sistema de control podría determinarse como robusto ya que responde de manera coherente a los diferentes estímulos a los que ha sido sometido. A continuación, para completar el análisis de esta herramienta como simulador de diseño de aletas estabilizadoras se realizará un estudio del comportamiento de los barcos frente a un cambio de ángulo de encuentro con la ola.

4.2.3 Análisis para distintos ángulos de encuentro con la ola

En este apartado se realizarán dos simulaciones, en las que se modificará el ángulo de encuentro con la perturbación generada por el oleaje, el cual es el ángulo que forma el vector de la velocidad del buque con el de la perturbación. De esta forma se analizará el comportamiento del barco en función del ángulo de entrada de la ola, suponiéndose que un ángulo igual a 90° produce el máximo momento de balanceo sobre el barco. A continuación, se establecen los parámetros para la simulación:

Parámetros	Caso 4	Caso 5
A_f	25 m^2	25 m^2
β	180°	135°
h_w	2.5 m	2.5 m

Tabla 4-4 Parámetros para simulación con cambio de ángulo de encuentro

Los parámetros que se han establecido en esta simulación se corresponden con una perturbación que entra directamente por la popa del barco (caso 4) y una perturbación que entra por la aleta (caso 5). Es importante analizar el cambio de ángulo de encuentro debido a que es uno de los factores que más afecta a una embarcación durante su navegación.

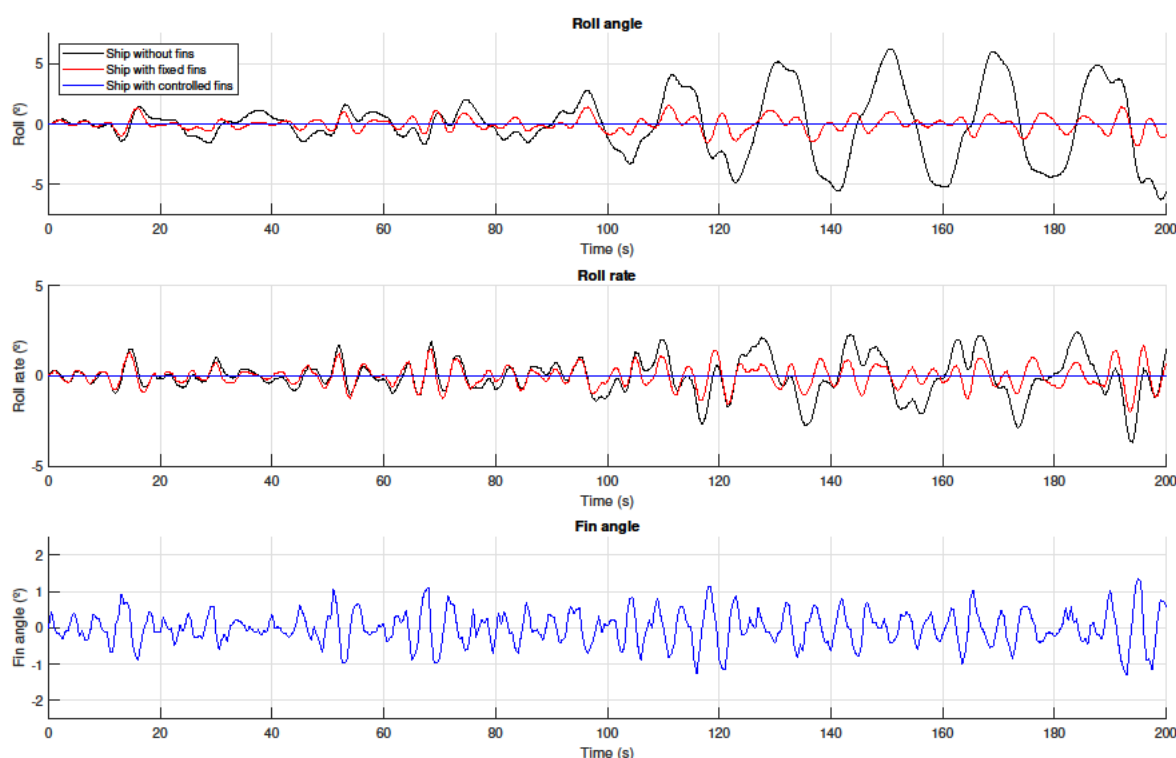


Figura 4-5 Funciones de balanceo (Caso 4) [Elaboración propia]

Tras realización la realización de la primera simulación correspondiente con el caso 4, se obtiene la Figura 4-5. En un primer lugar se observa que la influencia que produce la perturbación sobre la embarcación cuando el ángulo de encuentro es de 180° es mucho menor que cuando es de 90° , es decir, produce un momento de balanceo mucho menor. De forma similar a los casos anteriores, el barco que mayor movimiento de balanceo experimenta es el barco que no tiene aletas, llegando a alcanzar un ángulo de escora máximo de 6.21° a estribor en el segundo 150.5. Por el contrario, el barco con aletas sin sistema de control integrado experimenta un momento de balanceo menor, alcanzando un ángulo de escora máximo de 1.5° a estribor en el segundo 111. Finalmente, el barco con aletas con sistema de control integrado se mantiene estable durante todo el periodo de simulación, pero a diferencia del caso 1 (apartado 4.2.1.1) los valores que alcanza el ángulo de la aleta son menores, llegando a un máximo de 1.34° en el segundo 195.

A continuación, se realiza la simulación para un ángulo de encuentro de 135° , obteniéndose la siguiente figura:

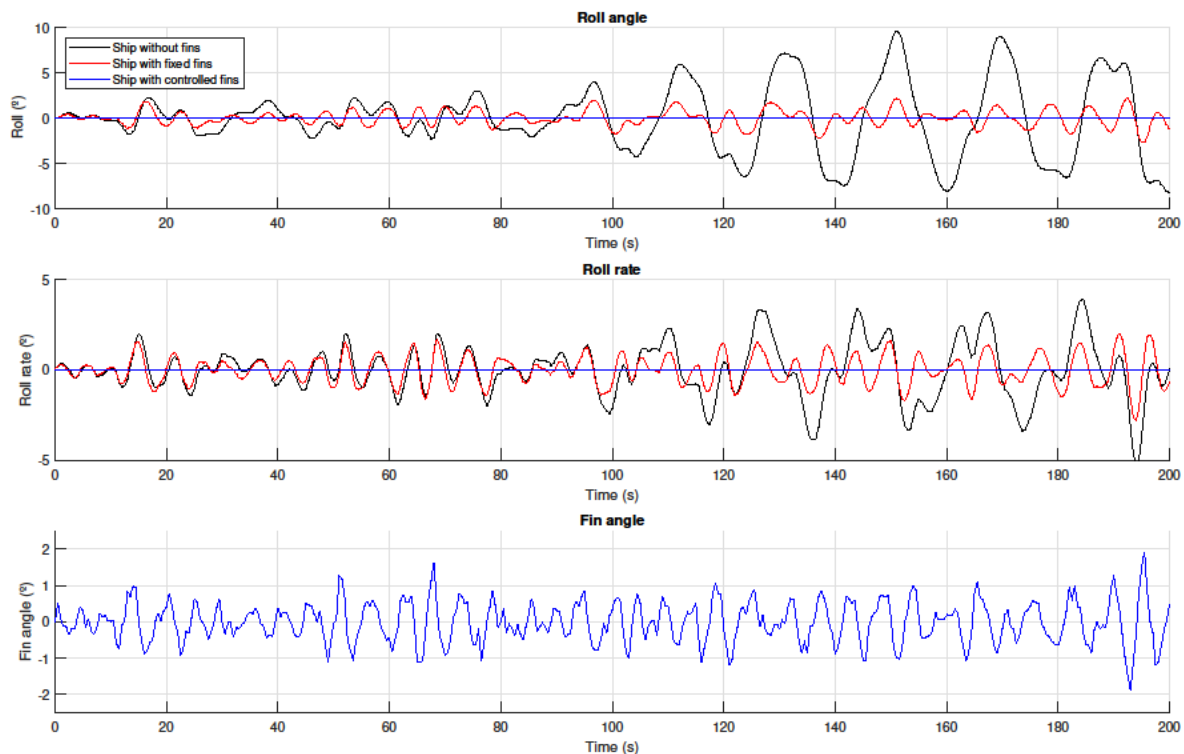


Figura 4-6 Funciones de balanceo (Caso 5) [Elaboración propia]

De la misma forma que en el caso 4 y analizando la Figura 4-6 se confirma que cuando el ángulo de encuentro es 90° el barco experimenta el máximo momento de balanceo. En esta simulación se observa mismo comportamiento que se observó en el caso 4, donde el barco sin aletas experimenta el mayor momento de balanceo, alcanzando un ángulo de escora de 9.62° a estribor en el segundo 151, observándose que con este ángulo de encuentro sufre un mayor momento de balanceo que cuando la perturbación entra por la popa. Asimismo, el ángulo de escora que experimenta el barco con aletas sin sistema de control es mayor que en el caso 4, alcanzando un valor de 2.19° a estribor en el segundo 151. Por último, el comportamiento de barco con aleta con sistema de control es muy similar al del caso 4, manteniéndose estable durante toda la simulación y alcanzando un ángulo de incidencia de la aleta de 1.92° en el segundo 195.

Las conclusiones que se obtienen del análisis para diferentes ángulos de incidencia son que el barco continúa respondiendo de manera correcta ante diferentes parámetros, observándose que el programa del sistema de control continúa presentando robustez en todas sus simulaciones. A continuación, se realizará la última simulación de los parámetros que se establecieron como modificables, donde se modifica la altura de la ola.

4.2.4 Análisis para distinta altura de ola

Seguidamente, en este apartado se realizará un análisis del comportamiento del barco en función de la variación de la altura de ola. Este parámetro es importante de analizar ya que es un valor muy influyente y variable en el entorno en el que se emplean los barcos. Se presentará una simulación donde se asigne un valor superior al establecido en el parámetro inicial, con la finalidad de analizar el movimiento de balanceo que experimentan los barcos y su posterior comportamiento reaccionando a este movimiento. A continuación, se establecen los parámetros que se van a emplear en el modelo:

Parámetros	Caso 6
A_f	25 m^2
β	90°
h_w	4 m

Tabla 4-5 Parámetros para simulación con cambio de altura de ola

En primer lugar, se realiza la simulación para una altura de ola de 4 metros, obteniéndose los siguientes gráficos:

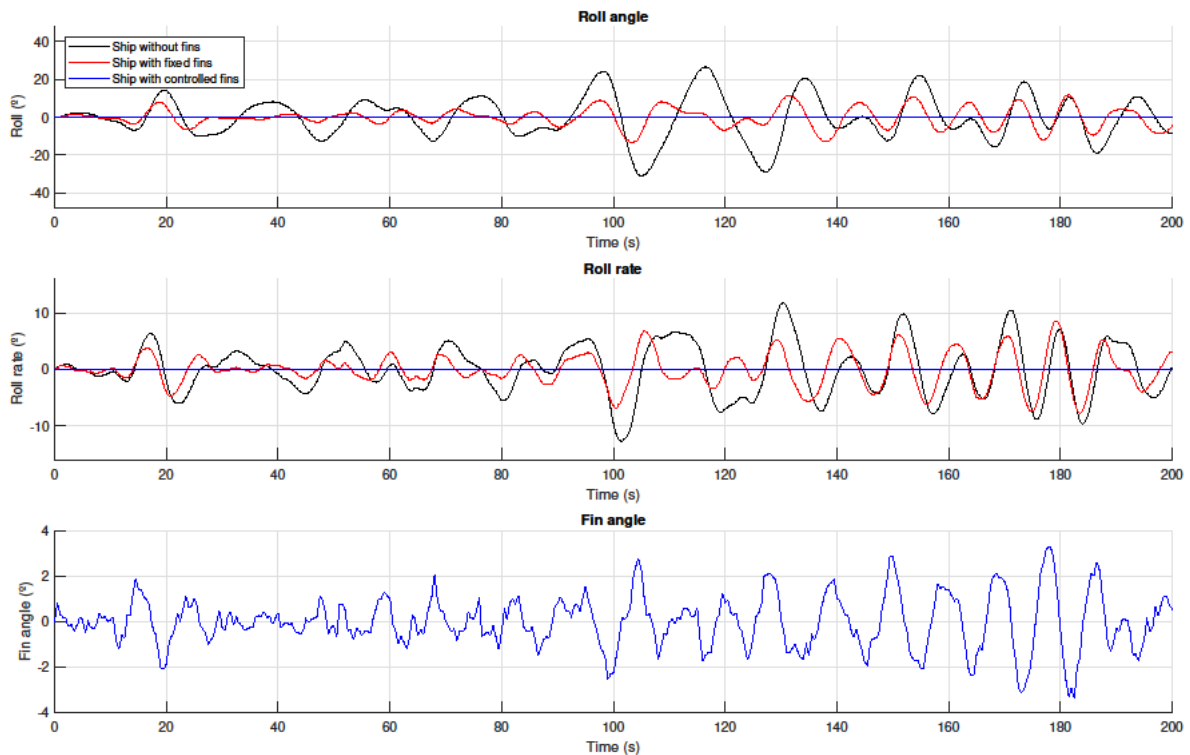


Figura 4-7 Funciones de balanceo (Caso 6) [Elaboración propia]

En la Figura 4-7 se presentan el comportamiento de los tres barcos para el nuevo parámetro. De la misma forma que en los casos anteriores se siguen comportando de tres maneras distintas, siendo el barco sin aletas el que más momento de balanceo presenta, llegando a alcanzar un ángulo de escora máximo de 30.99° a babor en el segundo 105. A su vez, el barco con aletas sin sistema de control presenta un momento de balanceo mayor que el que experimentaba en el caso 1 (apartado 4.2.1.1) llegando a alcanzar un ángulo de escora máximo de 13.13° a babor en el segundo 103.5, lo que significa que el barco responde de manera lógica ya que ha aumentado la altura de la ola. Por último, el barco con aletas con sistema de control integrado experimenta en un estado estable en toda la simulación, alcanzando un ángulo de aleta máximo de 3.34° en el segundo 182.5.

El programa continúa respondiendo de manera correcta ante un cambio de altura de ola. Finalmente se realizará una simulación donde se modificará un parámetro que afecte directamente al barco, es decir, se simulará cambiando las características del barco.

4.2.5 Análisis para distinto tipo de barco

Por último, en este apartado se realizará una modificación del tipo de barco, modificando un parámetro no establecido anteriormente. Este parámetro será el calado del buque, buscando la

comprobación del funcionamiento del simulador a la hora de implementar barcos con características distintas a las establecidas en el modelo de Ronghui Li [30]. En el caso 7 solo se modificará el calado del barco, disminuyéndolo un 53%. Por otro lado, se realizará otra simulación en la que se implementarán todos los parámetros que se han modificado en el análisis de programa, estableciendo diferentes estímulos para el estudio del comportamiento del barco. A continuación, se establecen los parámetros que se van a implementar en la simulación:

Parámetros	Caso 7	Caso 8
A_f	25 m^2	5 m^2
β	90°	90°
h_w	2.5 m	4 m
d	4 m	4 m

Tabla 4-6 Parámetros para simulación con cambio de barco

En primer lugar, se realiza la simulación para el caso 7, donde el calado tiene un valor de 4 m, obteniéndose los siguientes gráficos.

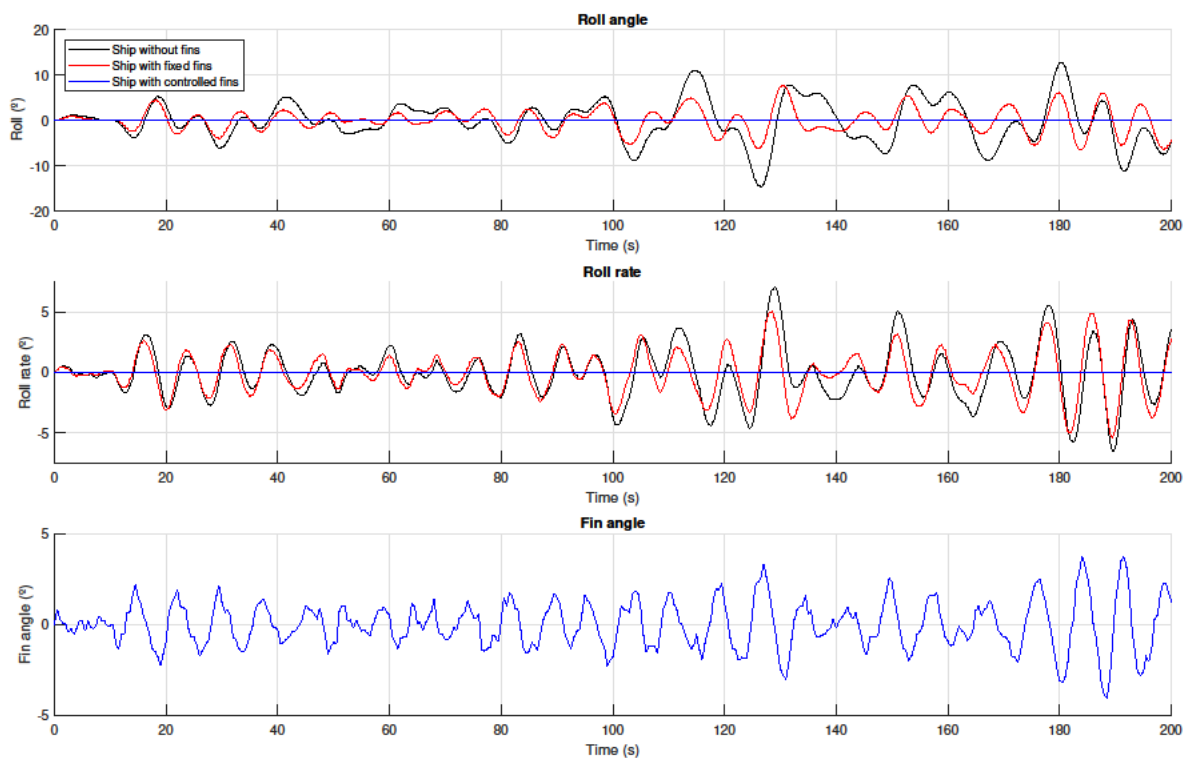


Figura 4-8 Funciones de balanceo (Caso 7) [Elaboración propia]

En la Figura 4-8 se observa que el barco sin aletas experimenta un ángulo de escora menor en comparación con el caso 1 (apartado 4.2.1.1), esto se debe a que un menor calado implica una disminución de la superficie en la que la ola va a impactar y en consecuencia el momento de balanceo que induce será menor produciendo un ángulo de balanceo máximo de 14.59° a babor en el segundo 126.5. A diferencia del caso sin aletas, el comportamiento del barco con aletas sin sistema de control es muy similar al que se observa en el caso 1, llegando a alcanzar un ángulo de escora superior con un valor de 7.8° a estribor en el segundo 130.5. Por último, se observa que el barco con aletas con sistema de control experimenta un comportamiento estable en toda la simulación, alcanzando un ángulo de aleta máximo de 4.01° en el segundo 188.5.

La conclusión que se obtiene respecto a la modificación de calado sin modificar ningún parámetro más del barco es que para un calado tan pequeño y mismo tamaño de aleta, es necesario que aumente el ángulo de incidencia para conseguir un estado de estabilidad.

A continuación, se realiza la última simulación implementando nuevos parámetros del barco, de la aleta y del entorno, como se estable en la Tabla 4-6.

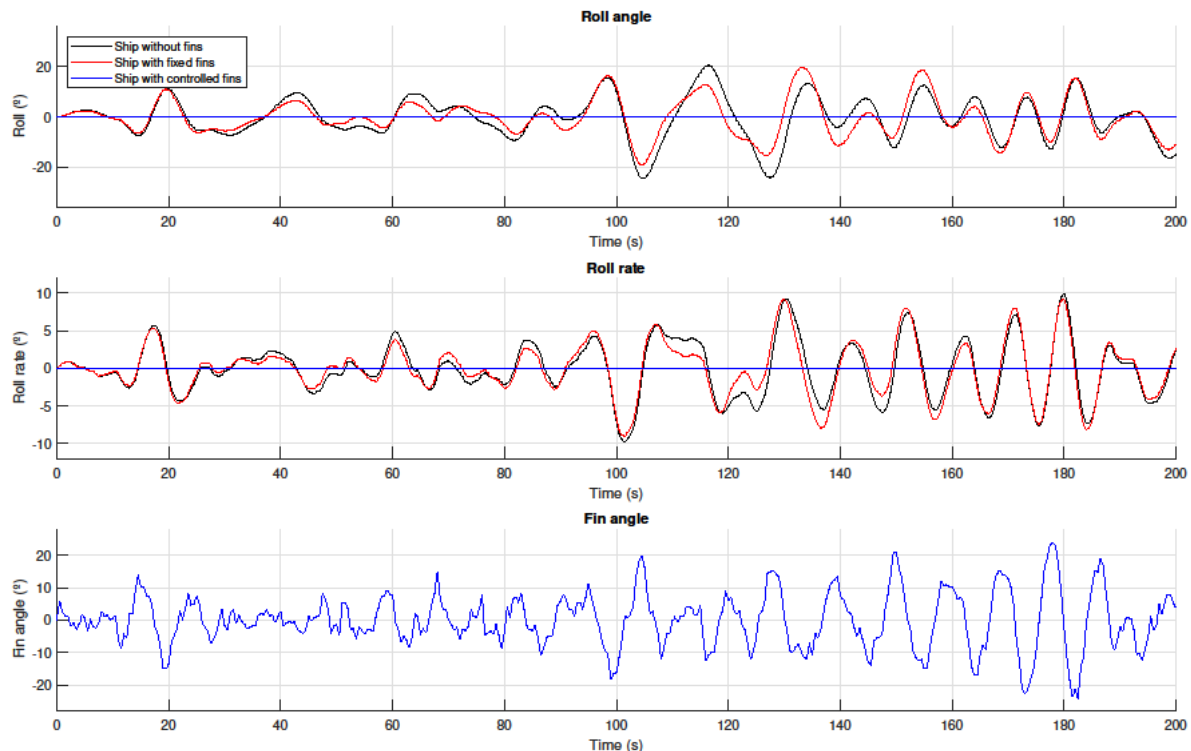


Figura 4-9 Funciones de balanceo (Caso 8) [Elaboración propia]

Tras la ejecución del programa con los nuevos parámetros se obtiene la Figura 4-9, en la que se observa que los tres barcos experimentan momentos de balanceo más exagerados. En primer lugar, se observa que el barco sin aletas se comporta de la misma forma que se ha visto en los casos anteriores, alcanzando un ángulo máximo de 24.25° a babor en el segundo 105; de la misma forma se comporta el barco con aletas sin sistema de control, describiendo una función de velocidad de balanceo muy similar a la que describe el barco sin aletas y llegando a alcanzar un ángulo de escora máximo de 19.57° a estribor en el segundo 133. Como se vio en el caso 2 (apartado 4.2.2) debido al reducido tamaño de la aleta no alcanza un estado de estabilidad a pesar de no tener un sistema de control integrado. Finalmente, se analiza el comportamiento del barco con aletas con sistema de control, describiendo una función de balanceo estable y alcanzando un ángulo de aleta máximo de 24.14° en el segundo 182.5

Esta última simulación ha sido la más exigente ya que en ella se pone a prueba el funcionamiento del programa, enfrentándose a la modificación de varios parámetros de manera simultánea. Es correcto determinar que el algoritmo de control desarrollado es robusto ya que responde de manera correcta a todos los cambios, ofreciendo una serie de funciones que permitirán al usuario analizar el funcionamiento de su aleta en función de las características de su barco, el tamaño de la aleta y el entorno en el que navegará.

4.2.6 Conclusión del análisis del modelo de un grado de libertad

En los apartados anteriores se ha realizado un análisis del comportamiento de los tres barcos según la modificación de diferentes parámetros que afectan directamente a su estabilidad. A continuación, se analizará la tendencia del ángulo máximo de incidencia de la aleta en función del tamaño de la aleta,

desde 50 m² hasta 10 m²; del calado de barco, desde 8,5 m hasta 4,5 m; y, por último, la altura de la ola, desde 0.5 m hasta 4.5 m. Seguidamente se relaciona la tabla que establece todos los datos numéricos:

Caso	Fin area	Fin angle	Ship draught	Fin angle	Wave height	Fin angle
1	50	1,39	8,5	4,01	0,5	0,53
2	45	1,54	8	3,73	1	0,854
3	40	1,73	7,5	3,51	1,5	1,74
4	35	1,98	7	3,34	2	2,42
5	30	2,31	6,5	3,2	2,5	2,77
6	25	2,77	6	3,09	3	3,3
7	20	3,46	5,5	2,99	3,5	3,75
8	15	4,62	5	2,9	4	3,34
9	10	6,93	4,5	2,83	4,5	3,4

Tabla 4-7 Tendencia del ángulo de aleta

Después de realizarse nueve simulaciones, se implementan los datos obtenidos en Excel para producir una gráfica que permita analizar la tendencia del ángulo de incidencia de la aleta.

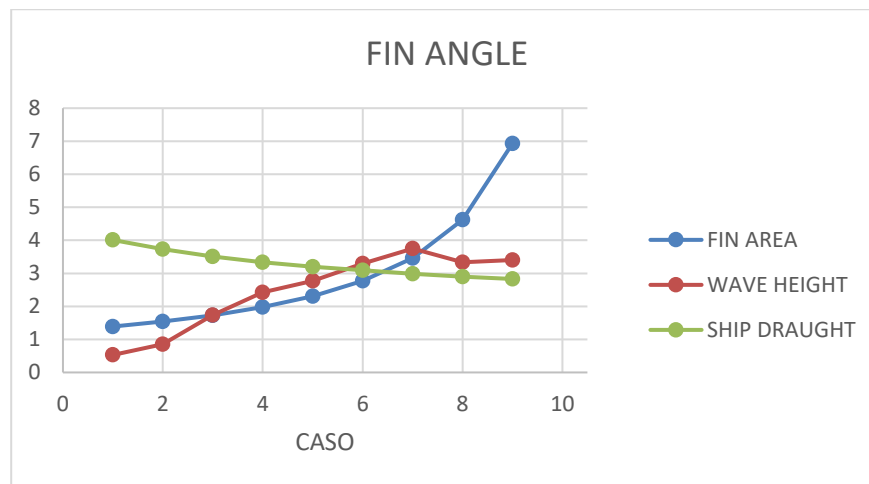


Figura 4-10 Tendencia del ángulo de aleta [Elaboración propia]

En la Figura 4-10 se observa tres funciones diferentes las cuales confirman el análisis realizado en el apartado anterior. En primer lugar, el comportamiento de la aleta a medida que disminuye su área es el esperado ya que el ángulo de incidencia aumenta debido a la disminución de desplazamiento de agua que realiza la aleta y, en consecuencia, menor efecto produce en el barco.

En segundo lugar, la función que define el ángulo de la aleta a medida que disminuye su calado es coherente. Como se vio en el apartado anterior, en función del aumento de calado, aumenta la zona de impacto del oleaje, y por lo tanto aumenta el momento de balanceo generado en el barco. De esta manera a mayor tamaño de aleta, menor ángulo de incidencia tendrá que alcanzar para estabilizar al barco.

En tercer lugar, se observa un comportamiento similar en la tendencia del ángulo de la aleta en la modificación de la altura de la ola. Observándose una tendencia de incremento de ángulo de incidencia a medida que aumenta la altura de la ola. Asimismo, son interesantes los resultados que se obtienen, observándose que tanto para el mínimo área de la aleta como para el máximo calado se obtiene ángulos de incidencia máximos. Por el contrario, el ángulo máximo de incidencia para la altura de ola no se obtiene cuando llega a la altura máxima sino en 3.5 metros, esto se debe a la geometría del barco, generando en el un momento de balanceo mayor que el que genera la altura de ola de 4 metros y por lo tanto alcanzando un ángulo de incidencia mayor.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Revisión de los objetivos

El presente Trabajo de Fin Grado propuso como principal objetivo el desarrollo de una herramienta que permitiese el análisis y diseño de sistemas de control de balanceo de barcos mediante aletas móviles. Antes del desarrollo de la herramienta y para poder cumplir el objetivo principal del proyecto, era indispensable realizar un estudio de los modelos matemáticos que definían la dinámica de balanceo de un barco.

Tras realizar los estudios de los modelos dinámicos, se decidió desarrollar un primer modelo simplificado de un grado de libertad en la plataforma de Matlab/Simulink, implementando el algoritmo de control integrado en las aletas estabilizadoras, el cual es el encargado de estabilizar la plataforma, obteniéndose las siguientes conclusiones:

- Se ha definido un modelo matemático que desarrolla la dinámica de balanceo de un barco con un grado de libertad, el cual permite modificar diferentes parámetros, proporcionando a la herramienta a diseñar una mayor versatilidad a la hora de analizar el estudio de diferentes aletas en diferentes embarcaciones. Todo ello se ha realizado basándose en ecuaciones de varios modelos matemáticos desarrollados por diferentes autores, pero en concreto, el modelo en el que se basa es en el trabajo de Isah Abdulrasheed Jimoh.
- Todas las ecuaciones definidas en el modelo de un grado de libertad fueron implementadas bajo el entorno Simulink, con el objeto de conseguir un modelo dinámico. Finalmente, se elaboró un modelo global del sistema que permitiese realizar la simulación de funcionamiento del conjunto, implementando el algoritmo de control desde Matlab. El resultado obtenido ha sido apropiado, obteniendo un modelo dinámico y configurable.
- Se han llevado a cabo una serie de simulaciones en función de cuatro parámetros: el área de la aleta, la altura de la ola, el ángulo de encuentro y el calado de barco. Dadas las características iniciales del modelo y tras comparar los resultados obtenidos, se observa un funcionamiento adecuado del modelo diseñado, analizándose un estado de equilibrio en el barco con aletas estabilizadoras, a pesar de las diferentes configuraciones. Es decir, el algoritmo de control implementado al modelo responde de manera precisa.
- Uno de los objetivos del proyecto era diseñar una aplicación App.Designer, permitiendo configurar los parámetros requeridos por el usuario y analizar en la propia interfaz los resultados obtenidos. Durante el desarrollo de la aplicación se diseñó una interfaz la cual permitía establecer los parámetros deseados, pero los resultados obtenidos no fueron los

esperados ya que la misma interfaz no presentaba los resultados, sino que simplemente ejecutaba el programa diseñado en Matlab. La razón principal por la que no se consiguió el diseño de la aplicación al completo fue por la falta de documentación de la propia plataforma.

Por otro lado, y al observar que el modelo diseñado era un modelo que no se aproxima a la realidad, ya que simula el movimiento de un barco que navega en línea recta a velocidad constante, se decidió implementar en Simulink un modelo de cuatro grados de libertad, el cual se basa en el trabajo definido por Zang Songtao. Este modelo define el avance y el abatimiento, como el balanceo y la guiñada, acercando la simulación a la realidad. Como se ha comentado en el capítulo 4.1 no se han podido finalizar las pruebas que validan el funcionamiento de este modelo.

5.2 Líneas futuras

Desde la primera globalización llevada a cabo por una expedición española y culminada por Juan Sebastián de Elcano en 1522 hasta nuestros días, se ha demostrado la importancia del tráfico marítimo en el pasado, en el presente y en el futuro, siendo el principal medio de transporte de mercancías. Es por eso por lo que este proyecto es el inicio de lo que se convertirá en un proyecto clave para el futuro de la simulación de la dinámica de los barcos como del desarrollo de barcos autómatas capaces de efectuar las operaciones que realizan, hoy en día, personas.

Este Trabajo de Fin de Grado es una pequeña herramienta que complementará el proyecto TraBoDit, donde se ha tratado de diseñar una herramienta que permita analizar el rendimiento de las aletas estabilizadoras como sistema estabilizador, comprobándose que es una herramienta útil y eficaz que permitirá a grandes astilleros estudiar el rendimiento de este sistema estabilizador antes de incorporarlos a los barcos. Tras las conclusiones de este trabajo se proponen diferentes vías como líneas futuras para continuar proyectos similares:

- Unos de los objetivos de este trabajo era diseñar una aplicación que facilitase la relación programa-usuario, como se establece en la conclusión, este objetivo se cumple de forma parcial. Por este motivo estudiar se podría estudiar la implementación de la herramienta diseñada en otra plataforma que muestre más facilidades.
- Desarrollar el modelo dinámico con seis grados de libertad, el cual simulará de manera real las fuerzas y momentos que experimentará el barco, permitiendo realizar un estudio completamente real de este tipo de sistema estabilizador.
- De manera más específica, todos los modelos analizados definen un movimiento simétrico de las aletas estabilizadoras, sin plantear un movimiento alternativo de las mismas. De ahí que se desarrolle un algoritmo de control que implemente un movimiento alternativo de las aletas, buscando su máximo rendimiento.
- El Trabajo de Fin Grado desarrollado por el Alférez de Fragata Pablo Barón Argos, el cual desarrolla un sistema de simulación y evaluación de maniobras compatibles con la regulación COLREG en escenarios con múltiples barcos, se podría integrar con los modelos dinámicos desarrollados en este proyecto, aumentando las capacidades de simulación de sistemas de control de navegación compatibles con COLREG.
- Por último, y analizando la línea de trabajo del proyecto TraBoDit, se podría llegar a implementar los modelos dinámicos en el simulador de navegación de la Escuela Naval en un futuro lejano. De tal forma que, si se establecen los parámetros correspondientes a diferentes barcos de la Armada o incluso de las Lanchas de Instrucción de la Escuela Naval, se podrían estudiar mediante simulaciones las capacidades de maniobrabilidad de estas embarcaciones.

6 BIBLIOGRAFÍA

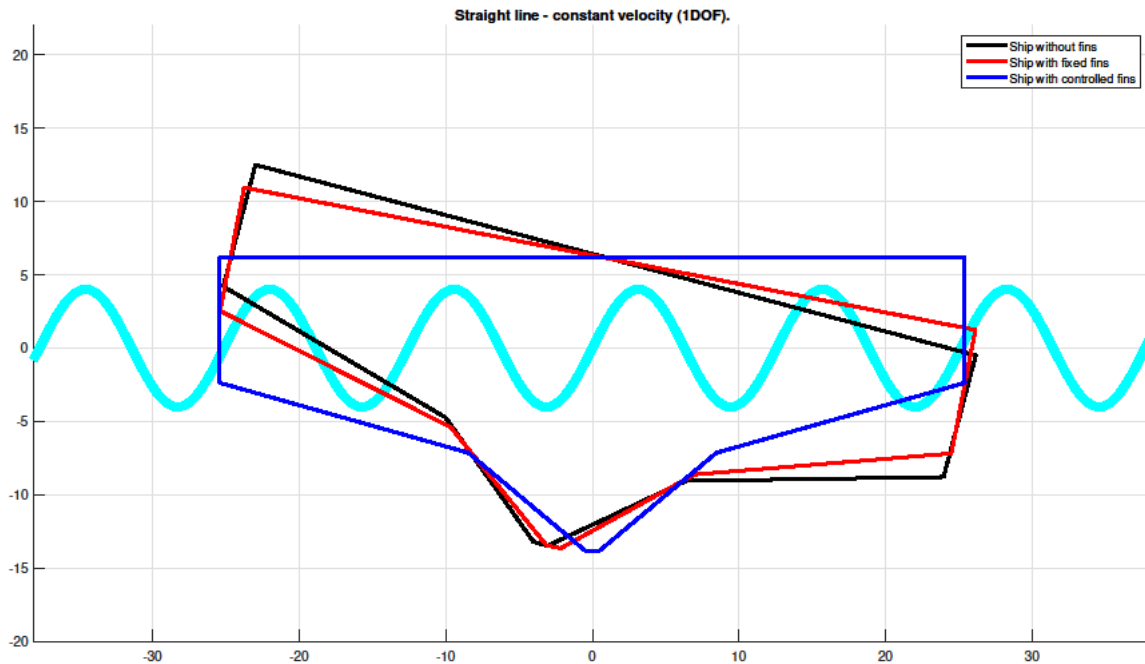
- [1] S. Kumar y J. Hoffmann, *Maritime Economics and Business*, Londres: Lloyds List Press, 2002.
- [2] J. M. Bascón Mallado, «Modelado y control de una plataforma de estabilización inercial,» Sevilla, 2019.
- [3] C. Palos Forcano, «Análisis de la estabilidad de un buque durante la operación de descarga de una carga pesada,» 2014. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu>. [Último acceso: 20 Febrero 2022].
- [4] I. Barbudo Escobar, *Fundamentos de maniobra*, Madrid, 2004.
- [5] «Encvirtual.es,» [En línea]. Available: <https://encvirtual.es/cursos/PER/C3/Seguridad1.htm>. [Último acceso: 13 Enero 2022].
- [6] C. J. D. Viera, «Estudio del sistema estabilizador y sus posibles fallos: buque benchijigua express,» Nuevas publicaciones, Santa Cruz de Tenerife, 2015.
- [7] «Olympics.com,» 1 Agosto 2021. [En línea]. Available: <https://olympics.com/es/noticias/buenos-dias-espana-dia-9-juegos-tokio-2020-1-agosto>. [Último acceso: 25 Enero 2022].
- [8] T. Perez y M. Blanke, «Ship Roll Damping Control,» 2012. [En línea]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1367578812000119>. [Último acceso: 15 enero 2022].
- [9] M. D. Mansilla, «Gestion de un proyecto de instalación de estabilizadores en un yate de 50m de eslora,» Barcelona, 2014.
- [10] V. d. Klugt, «Rudder roll stabilization,» *Naval Engineers Journal*, Mayo 1990.
- [11] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, Noruega: Wiley, 1994.
- [12] T. Pérez y M. Blanket, «Mathematical Ship Modeling for Control Applications,» DTU Library, 2002.
- [13] J. Olivella Puig, *Teoría del buque*, Barcelona: Edicions UPC, 1995.
- [14] E. V. Lewis, *Principles of Naval Architecture (II)*, Sname, 1988.
- [15] T. Perez, «Ship Motion Control: Course Keeping and Roll Stabilisation Using Rudder and Fins,» Londres, 2005.
- [16] L. Lihua, S. Mingxiao y L. Tiantian, «Design Fuzzy Input-Based Adaptive Sliding Mode,» 25 Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/>. [Último acceso: 03 Febrero 2022].

- [17] M. Hinostroza, L. Weilin y G. S. C., «Robust fin control for ship roll stabilization based on L2-gain design,» *Ocean Engineering*, vol. 94, 2015.
- [18] Z. Sun, G. Zhang, B. Yi y W. Zhang, «Practical proportional integral sliding mode control for underactuated surface ships in the fields of marine practice,» *Ocean Engineering*, 2017.
- [19] Z. Songtao y Z. Peng, «L2-Gain Based Adaptive Robust Heel/Roll Reduction Control Using Fin Stabilizer during Ship Turns,» *Marine Science and Engineering*, 2021.
- [20] M. Abkowitz, «Lectures on Ship Hydrodynamics-Steering and Manoeuvrability,» Lyngby, Dinamarca, 1964.
- [21] M. G. Sarch, «Fin Stabilizers As Maneuver Control Surfaces,» 01 12 2003. [En línea]. Available: <https://apps.dtic.mil>. [Último acceso: 15 Febrero 2022].
- [22] D. Wang, «Research on Effects of Ship Turning Performance under Rudder/Fin Control,» Harbin, 2013.
- [23] T. I. Fossen, *Handbook of marine craft hydrodynamics a motion control*, Noruega: Wiley, 2011.
- [24] W. J. Pierson Jr. y L. Moskowitz, «A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii,» *Advancing earth and space science*, 1964.
- [25] L. Wang y N. I. Xiros, «Design and Comparison of H_∞/H_2 Controllers for Frigate Rudder Roll Stabilization,» *Journal of Marine Science and Application*, 2019.
- [26] MathWorks, «Mathworks,» 1994. [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com>. [Último acceso: 02 Febrero 2022].
- [27] Y. Yang, C. Zhou y X. Jia, «Robust adaptive fuzzy control and its application to ship roll stabilization,» Mayo 2002. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com>. [Último acceso: 28 Enero 2022].
- [28] I. Abdulrasheed Jimoh, «Fin control for ship roll motion stabilisation based on observer enhanced MPC with disturbance rate compensation,» *Ocean Engineering*, 2021.
- [29] H. Ghassemi, «Control of Roll Motion of Fishing Vessel by Fin-Stabilizer Using PID Controller,» *Internacional Journal of Physics*, 2016.
- [30] R. Li y T. Li, «An adaptive neural network approach for ship roll stabilization via fin control,» 15 Enero 2016. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com>. [Último acceso: 01 Febrero 2022].

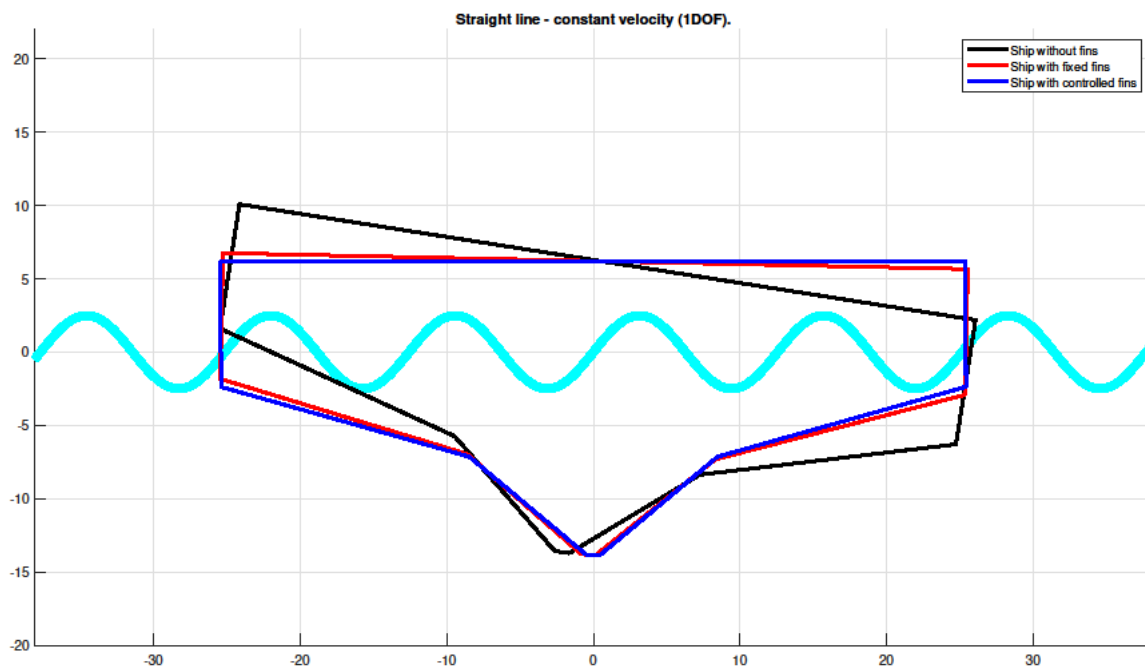
ANEXO I: GRÁFICO CORTE TRANSVERSAL 1DOF

En este anexo se muestran los gráficos producidos con las simulaciones realizadas en el apartado 4.2 para el instante final de la simulación (segundo 200), donde se analiza el comportamiento del algoritmo de control implementado en el modelo 1DOF.

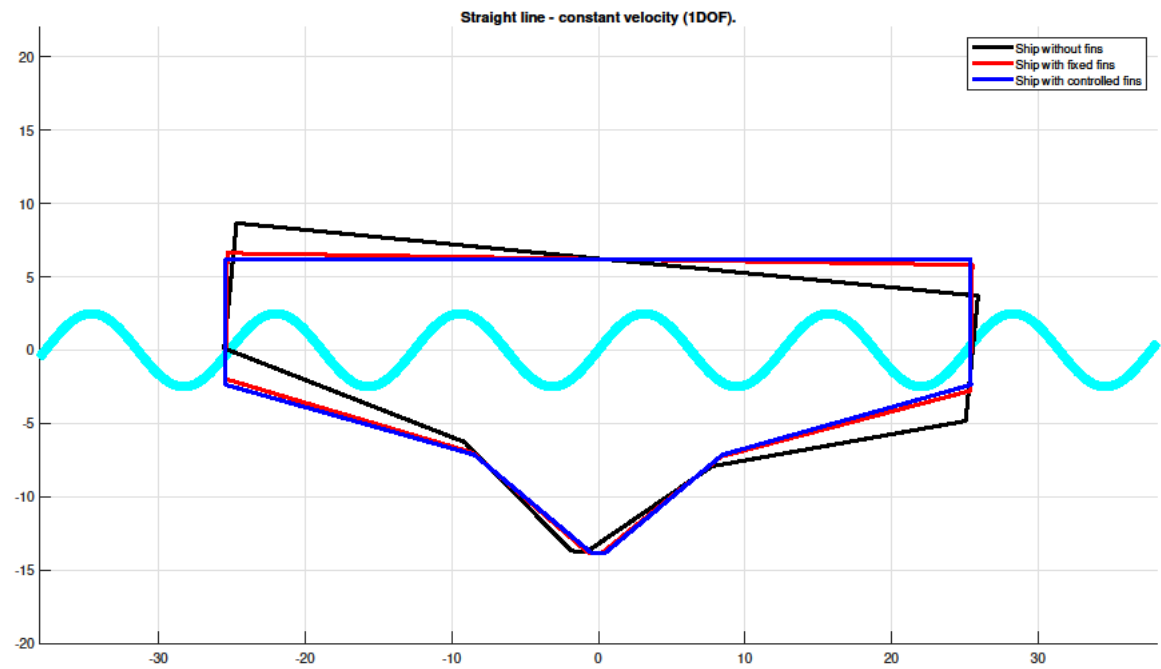
CASO 2:



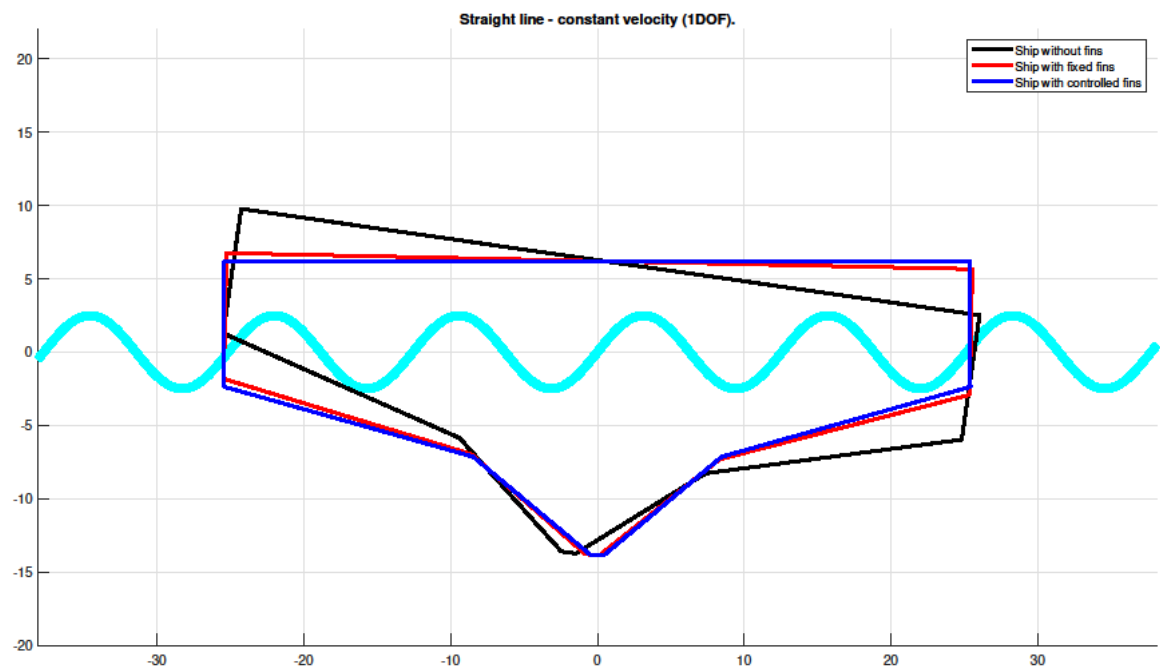
CASO 3:



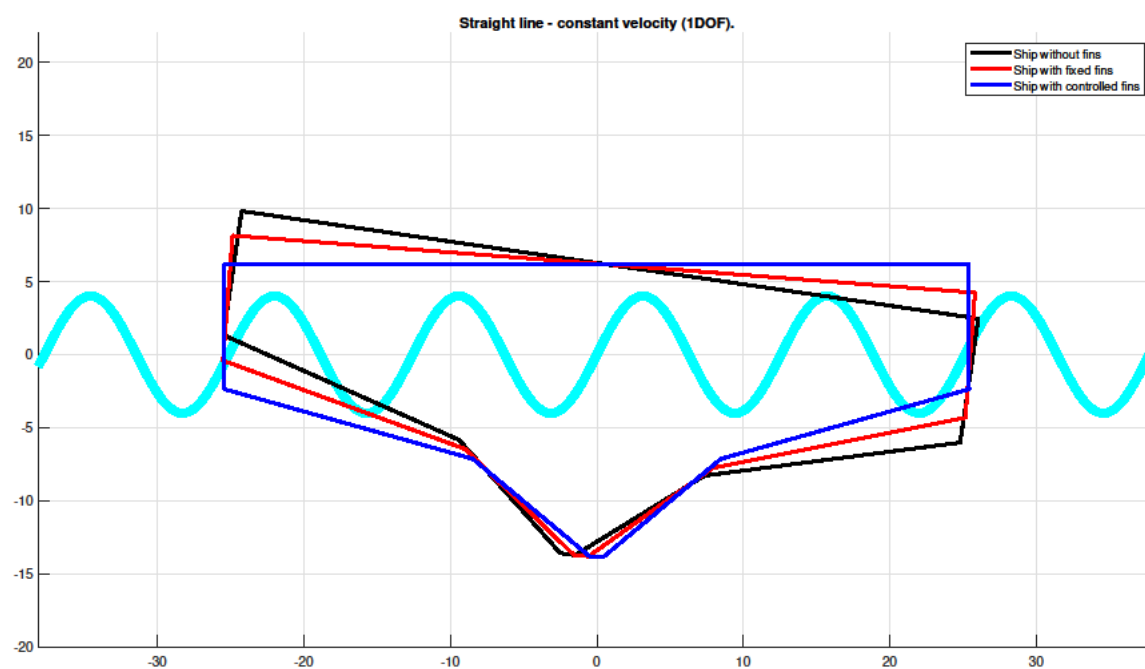
CASO 4:



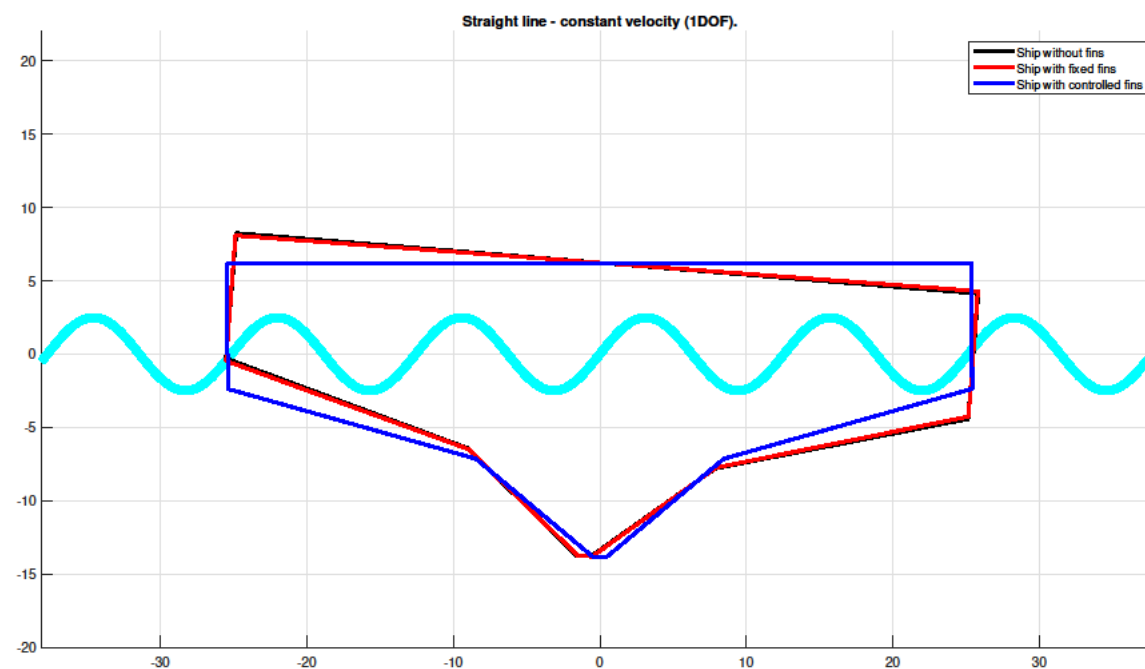
CASO 5:



CASO 6:



CASO 7:



CASO 8:

