



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Desarrollo de un sistema de control para la navegación de un barco autónomo

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Autor: Daniel Martínez Martínez
Director: Miguel Almonacid Kroeger
Codirector: José Manuel Cano Izquierdo

Cartagena, 11 de junio de 2019



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Resumen

Desde finales de siglo, el estudio en el ámbito de la navegación autónoma ha hecho grandes progresos, pasando de la asignación de tareas de muestreo y toma de datos a considerarse actualmente como la forma futura de transporte marítimo de pasajeros y mercancías.

Son numerosos los trabajos que se están llevando a cabo y que están potenciando esta tecnología, lo que convierte a la navegación autónoma en un campo de investigación en el que aún está por explotar todo su potencial.

En este proyecto se desarrolla paso a paso el sistema de control que se requeriría para un determinado modelo de embarcación, obtenido a partir de la simplificación de una embarcación real. Se tratarán distintos puntos, desde las consideraciones y características constructivas del modelo, pasando por el estudio de la respuesta de las variables a estudiar, hasta la realización de una interfaz de usuario por la que visualizar la respuesta del sistema de control.

Abstract

Since the end of the century, the study in the field of autonomous navigation has made great progress, moving from the allocation of sampling and data collection tasks to currently being considered as the future form of maritime transport of passengers and goods.

As a result of the numerous studies which are fostering this technology, autonomous navigation has become a field of research in which its full potential has to be still exploited.

This project develops step by step the control system that would be required for a given model of vessel, obtained from the simplification of a real vessel. Different points will be dealt with, from the considerations and constructive characteristics of the model, through the study of the response of the variables to be studied, to the creation of a user interface through which to visualise the response of the control system.

Índice

1. Antecedentes	7
1.1. Objetivos.....	7
1.2. Punto de partida	8
1.3. Proyectos relacionados	8
2. Consideraciones y ecuaciones generales.....	13
2.1. Consideraciones y simplificaciones para el sistema de control	14
2.2. Cinemática.....	22
2.3. Dinámica.....	25
2.4. Posicionamiento	27
3. Desarrollo y funcionamiento básico del sistema de control.....	29
3.1. Proceso de diseño	29
3.2. Elección de modo y control de la velocidad.....	39
3.3. Consideraciones sobre el modelo de oleaje y viento	42
4. Visión global del sistema de control: funcionamiento y respuestas.....	45
4.1. Diseño y respuestas del sistema de control en Simulink	45
4.2. Aplicación GUI en MATLAB.....	61
4.2.1. Adaptaciones del modelo matemático al código.....	64
4.2.2. Respuestas del sistema y visualización	67
4.3. Comparativa de resultados entre Simulink y GUI de MATLAB	69
5. Diseño de experimentos y ensayos para la obtención de parámetros.....	73
6. Conclusiones	77
7. Posibles aplicaciones y ampliaciones futuras.....	79
8. Bibliografía y referencias.....	81
9. Anexos	83

Figura y Tablas

Figura 1.1. AutoCat ASC [3].

Figura 1.2. DELFIM ASC [4]

Figura 1.3. Primera demostración del ferry SVAN de Rolls Royce y Finferries [5].

Figura 1.4. Barco autónomo desarrollado por Buffalo Automation Group [8].

Figura 2.1. Sistemas de referencia global (inercial, S_I) y local (ligado al barco, S_R) [10].

Figura 2.2. Representación de la estructura del catamarán.

Figura 2.3. Representación simplificada del modelo del catamarán.

Tabla 2.1. Medidas adaptadas para el modelo.

Figura 2.4. Entradas y salidas del sistema físico del modelo del barco.

Figura 2.5. Representación de cómo actúan las fuerzas y momentos sobre el casco.

Tabla 2.2. Peso de la embarcación por componentes.

Figura 2.6. Robot propulsado de forma diferencial por dos ruedas [2].

Figura 3.1. Entradas y salidas del sistema físico del modelo.

Figura 3.2. Sistema físico del modelo propuesto en Simulink.

Figura 3.3. Primera idea para el desarrollo del sistema de control.

Figura 3.4. Primera idea para el desarrollo del sistema de control en Simulink.

Figura 3.5. Representación de cómo se alcanza el Waypoint.

Figura 3.6. Control para la mantención de velocidad y rumbo.

Figura 3.7. Ejemplo de selección del giro óptimo.

Figura 3.8. Valor del error de posición según la posición del Waypoint, relativa al barco.

Figura 3.9. Lazo de control del barco simplificado.

Figura 3.10. Lazo de control del barco en “Modo Manual” simplificado.

Figura 3.11. Lazo de control del barco en “Modo Autónomo” simplificado.

Figura 3.12. Primeros grados de la Escala Internacional del estado del mar (Douglas).

Figura 3.13. Capa límite terrestre en la superficie de un mar en calma [14].

Figura 3.14. Condiciones meteorológicas en el Mar Menor. Comparación entre viento y oleaje [15].

Figura 4.1. Vista general del sistema de control en Simulink.

- Figura 4.2. Sistema físico del barco en Simulink.
- Figura 4.3. Selección del Waypoint en Simulink.
- Figura 4.4. Selector de modo en Simulink.
- Figura 4.5. Propulsión en “Modo Manual” en Simulink.
- Figura 4.6. Respuesta del barco en “Modo Manual”.
- Figura 4.7. Propulsión en “Modo Autónomo” en Simulink (lazo abierto).
- Figura 4.8. Variación de voltaje en los motores en modo autónomo.
- Figura 4.9. Selección de condiciones iniciales en Simulink.
- Figura 4.10. Calculador del cuadrante del Waypoint en Simulink. Primera parte.
- Figura 4.11. Calculador del cuadrante del Waypoint en Simulink. Segunda parte.
- Figura 4.12. Rumbo que sigue el barco en cada instante entre 0 y 2π .
- Figura 4.13. Selector del giro óptimo en Simulink.
- Figura 4.14. Voltaje corrector enviado a los motores, de valor medio cero.
- Figura 4.15. Distancia al Waypoint en el tiempo.
- Figura 4.16. Detector de llegada Waypoint en Simulink.
- Figura 4.17. Voltaje nominal enviado a los motores.
- Figura 4.18. Corrector del ángulo de orientación en Simulink.
- Figura 4.19. Modelos propuestos para controlar la velocidad en Modo Autónomo.
- Figura 4.20. Respuesta del barco en cada uno de los modelos propuestos anteriores.
- Figura 4.21. Respuesta del barco en el Waypoint para los modelos propuestos anteriores.
- Figura 4.22. Respuesta de la velocidad en cada uno de los modelos propuestos anteriores.
- Figura 4.23. Medición de posición y velocidad en Simulink.
- Figura 4.24. Curva de la velocidad desde el origen hasta el Waypoint en Simulink.
- Figura 4.25. Simulación de perturbaciones entrantes al sistema físico en Simulink.
- Figura 4.26. Interfaz de usuario GUI en Matlab.
- Figura 4.27. Panel de selección del Waypoint y velocidad de consigna.
- Figura 4.28. Panel de selección de modo.
- Figura 4.29. Panel de especificación de condiciones iniciales.
- Figura 4.30. Panel de visualización de las variables del sistema.
- Figura 4.31. Panel de configuración de la magnitud de las perturbaciones (viento y oleaje).

Figura 4.32. Simulación con la UI de MATLAB. Modo Manual.

Figura 4.33. Simulación con la UI de MATLAB. Modo Autónomo.

Figura 4.34. Respuesta del barco al alcanzar el Waypoint. Modo Autónomo.

Figura 4.35. Experimento en GUI de MATLAB para las condiciones especificadas.

Figura 4.36. Experimento en Simulink para las condiciones especificadas. Posición.

Figura 4.37. Experimento en Simulink para las condiciones especificadas. Velocidad.

Figura 9.1. Esquema general para el modelo del proyecto VAMAR [1].

Figura 9.2. Esquema del conexionado por bloques de la electrónica embarcada en el proyecto VAMAR [1].

Figura 9.3. Motor eléctrico JAGO 55 lb - 12Vdc – 0,636 kW.

Figura 9.4. Compás ciego AIRMAR.

Figura 9.5. Smart TRIDUCER AIRMAR.

Figura 9.6. Antena GPS GARMIN.

Figura 9.7. Anemómetro con veleta RAYMARNE.

Figura 9.8. Trama NMEA 0183 con información de localización del barco.

Figura 9.9. Trama NMEA 0183 de información mínima para la navegación.

Figura 9.10. Trama NMEA 0183 con información del rumbo y del Waypoint.

Figura 9.11. Trama NMEA 0183 con información de las condiciones del viento.

Figura 9.12. Esquema del sistema electromecánico de los motores embarcados [23].

Figura 9.13. Diagrama de bloques del sistema electro-mecánico [24].

Figura 9.14. Nomenclatura utilizada para describir el movimiento de un barco.

Figura 9.15. Velocidad del viento en función de la altura al suelo y la rugosidad del terreno [13].

Figura 9.16. Escala Internacional del estado del mar (Douglas).

Figura. 9.17. Esquema simplificado del sistema de control en una embarcación autónoma propulsada por motores y dirigida por un timón [10].

Figura 9.18. Control del rumbo por medio de un sistema de piloto automático [10].

Figura 9.19. Dimensiones del catamarán del proyecto VNAS (en cm).

Figura 9.20. Sistema de control del catamarán en Simulink.

1. Antecedentes

1.1. Objetivos

Con este trabajo lo que se pretende realizar es el diseño de un sistema de control para una embarcación autónoma que sea capaz de realizar misiones tanto de forma autónoma como de forma dirigida, y que a la vez este documento sirva de apoyo para futuros trabajos en la materia. Se van a tratar temas como el estado de la navegación autónoma, los requisitos que debe cumplir el sistema de control, la determinación de las entradas y salidas del mismo, el estudio de diferentes alternativas y el desarrollo de un simulador para estudiar el comportamiento antes de su implantación en un barco.

Establecer una clara relación entre las entradas y salidas y mostrar cómo son las respuestas del sistema es un punto muy importante a desarrollar, pues proporcionará la información que se requiere para poder diseñar un sistema estable que dote de autonomía al modelo de barco que se va a proponer. Además, la capacidad de estudiar distintas soluciones al problema también nos dará una información muy importante a la hora de elegir qué variables son las más adecuadas para ser controladas o servir de control.

Pero el principal objetivo de este TFE va a consistir en el **diseño del sistema de control de una embarcación autónoma** (basándose en el funcionamiento las conocidas como *Autonomous Surface Craft* o ASC¹), que, *grosso modo*, permitirá a la embarcación **moverse tanto de forma autónoma como de forma dirigida manualmente**, según se desee, siendo capaz de responder a las señales y perturbaciones a las que esté sometido de forma satisfactoria. La primera fase del **diseño del sistema de control** se realizará **en Simulink**, y para una mejor apreciación, en segundo lugar, se va a crear una **interfaz de usuario GUI en MATLAB** con la que se **simulará** el movimiento y las **respuestas del barco**² para hacer más visuales y entendibles las maniobras realizadas.

Una vez finalizado este documento se podrán aplicar los resultados y las conclusiones obtenidas para diseñar un sistema de control autónomo robusto que se ajuste a los requerimientos un proyecto al que se ha bautizado con el nombre de VNAS³, llevado a cabo entre las escuelas de Navales, Teleco, e Industriales de la UPCT.

¹ ASC: Embarcación ligera que realiza una misión de forma autónoma y que a la vez es capaz de transmitir información a una estación base a través de enlaces de radiofrecuencia [1]. En el apartado “9. Anexos” se especifica los distintos tipos de embarcaciones autónomas que existen.

² Al no estar enviando ni recibiendo señales a ningún equipo físico no podemos hablar de “Tiempo Real”, por lo que el tiempo en el que se dan las respuestas del simulador se aproxima mucho al transcurso del tiempo en la realidad, pero sin llegar a ser estrictamente real.

³ VNAS: Vehículo de Navegación Autónoma en Superficie (ver “9. Anexos”).

1.2. Punto de partida

La idea de este proyecto surge de los trabajos realizados anteriormente en relación al desarrollo de embarcaciones autónomas [1] [2], que a su vez, también forma parte de la fase inicial a la implementación de un sistema de control en una embarcación real, más concretamente un pequeño catamarán, que es la que se ha elegido para el proyecto VNAS.

Este campo de estudio está en auge en la actualidad, pues en los últimos años se han desarrollado sistemas de control que permiten dirigir una embarcación de forma autónoma, a la vez que puede ser controlada y monitorizada desde una estación base para el desarrollo de tareas sin necesidad de personal, con el objetivo de ampliar las zonas de toma de mediciones y reducir los costes de estos trabajos [1] [2].

Este mismo trabajo realizado por un equipo de personas supondría un gasto bastante elevado que no siempre se puede asumir. Abaratar los costes de estos trabajos hace más accesible la realización de experimentos a la vez que ayuda a conocer mejor el estado del entorno estudiado, para poder actuar sobre él si fuera necesario de forma casi inmediata [1] [2].

Es por eso que este TFE comienza apoyándose en un informe realizado en 2005 por Humberto Martínez Barberá, profesor titular de la Universidad de Murcia, llamado VAMAR⁴, en el que se presentan las bases para diseñar una pequeña embarcación autónoma destinada a trabajos de toma de datos y mediciones de parámetros en aguas interiores o cercanas a la costa [1] [2].

En el proyecto VAMAR se especifican numerosos datos sobre el tipo de embarcación, cuál es el esquema general del sistema de control, la forma de propulsión, la electrónica embarcada o las comunicaciones, pero este TFE va a centrarse únicamente en la parte del desarrollo de un sistema de control y en comprobar si su comportamiento ante un planteamiento sencillo de modelo de embarcación y entorno es correcto y próximo a la realidad. Para ello la herramienta que se utilizará será MATLAB, tanto por su alta capacidad de trabajo y disponibilidad de contenidos en línea, como por su accesibilidad al usuario y su presencia como herramienta en muchas asignaturas de ingeniería y otras carreras técnicas.

Con estas condiciones se puede empezar a elegir el conjunto de ecuaciones cinemáticas y dinámicas del barco, y cuando se tiene una idea de cómo deben ser estas ecuaciones y cómo tiene que funcionar el sistema de control, con Simulink, herramienta gráfica de MATLAB, se puede comenzar a diseñar el diagrama de bloques que representa tanto el modelado del sistema físico del barco como el sistema de control.

1.3. Proyectos relacionados

Respecto al desarrollo de embarcaciones autónomas en los últimos 20 años vamos a mencionar algunos proyectos que han llegado a realizar pruebas reales, reconocidos a nivel internacional y que sirvieron de referentes para iniciar el proyecto VAMAR:

⁴ VAMAR: Vehículo Autónomo para Aplicaciones Marinas (ver “9. Anexos”).

- AutoCat Autonomous Surface Craft. MIT (1996-1997).

Desarrollada en los 90 por el MIT, se trata de una embarcación de 1,8 m de configuración multicasco (figura 1.1), cuyos campos de estudio son la batimetría de precisión en áreas reducidas y el desarrollo de una red marina de vehículos autónomos, tanto de superficie como submarinos para la colaboración en tareas con grandes zonas de estudio [1] [3]. Es uno de los primeros proyectos que se ha llevado a cabo en lo que respecta al desarrollo de la navegación autónoma.



Figura 1.1. AutoCat ASC [3].

- DELFIM Autonomous Surface Craft. IST/ISR Lisboa (1999).

DELFIM ASC es un pequeño catamarán de 3,5 m (figura 1.2) desarrollado por el Instituto Superior de Robótica de Lisboa, capaz de maniobrar de forma autónoma mientras realiza la tarea de adquisición automática de datos marinos [1]. Fue diseñado para trabajar tanto de forma individual como en adquisición de datos en conjunto con INFANTE AUV, un vehículo autónomo submarino.



Figura 1.2. DELFIM ASC [4].

El objetivo de su desarrollo sigue la tendencia de querer implementar sistemas que abaraten los costes y que mejoren la eficiencia de las operaciones oceanográficas que se realizan

normalmente. Para ello cuenta con un enlace de radio con una cobertura de hasta 80 km, sistema diferencial de localización (DGPS) y sensorización que le permite responder ante el medio en el que se encuentra [4]. Ya se han realizado pruebas reales con él en las Islas Azores.

Del proyecto VAMAR es del que partimos para la realización tanto de este TFE como del proyecto VNAS entre las escuelas de la UPCT, pero también es necesario fijarse en el estado actual de esta tecnología. Estos son algunos de los proyectos más relevantes con objetivos similares en los que nuestros trabajos quieren enmarcarse:

- SVAN. Rolls Royce (2015-actualidad).

A finales de 2018, gracias a la colaboración que empezó en 2015 entre Rolls Royce y Finferries, se realizó la primera demostración en el mundo de un ferry completamente autónomo (figura 1.3), bautizado como SVAN (Safer Vessel with Autonomous Navigation). La demostración se realizó cubriendo la existente ruta de ferry que conecta el archipiélago de Turku, en Finlandia, realizando el viaje tanto de forma autónoma como por control remoto desde la estación base, a 45 km del archipiélago. Entre los hitos más destacables del proyecto se menciona que completaron exitosamente 90 maniobras de auto-ataque, que cumple con 73 requerimientos de seguridad según las autoridades del país y que cuenta con un total de 70 tests de ciberseguridad, además de que el buque dispone también con un sistema de ciberseguridad las 24 horas [5].



Figura 1.3. Primera demostración del ferry SVAN de Rolls Royce y Finferries [5].

Además, la filial constructora de submarinos de la conocida empresa de automoción abrió en 2018 unas nuevas instalaciones destinadas al desarrollo de tecnología Rolls Royce para amoldarse a un futuro con una industria mercantil mundial cada vez más autónoma [6].

- Buffalo Automation Group, Buffalo University (2014-actualidad).

Buffalo Automation Group es una *startup* creada por tres estudiantes de la Universidad de Búfalo en Estados Unidos el pasado 2014. Esta agrupación surgió con el fin de desarrollar tecnología para crear embarcaciones autónomas. Por primera vez probaron su tecnología en un

catamarán de 16 pies (figura 1.4), resultando un completo éxito, además de presentar algunas patentes de sus productos y de obtener miles de dólares en fondos [7].



Figura 1.4. Barco autónomo desarrollado por Buffalo Automation Group [8].

Al contrario de los sistemas de piloto automático que tienen actualmente tanto embarcaciones como aviones, su tecnología es predictiva, obteniendo datos de sensores, cámaras y tecnología inalámbrica, y fusionando todos estos en tiempo real. Condiciones atmosféricas, obstáculos en el agua como otros barcos, y otros tipos de información estática como son las cartas náuticas son algunos de los datos que manejan sus sistemas de control [7].

El objetivo final de esta empresa es proveer a los medios de navegación actuales y futuros de esta tecnología, para así disponer de una navegación más segura y eficiente. Estos sistemas también permiten al capitán tomar el control en cualquier momento, pero esto no deja de lado el alto potencial que tiene respecto a la reducción de costes en aseguradoras [7].

2. Consideraciones y ecuaciones generales

Para abordar las ecuaciones que explican el movimiento de este modelo de embarcación se ha decidido basarse en las utilizadas por proyectos como el VAMAR [2], entre otros [9], en los que se explica de forma concisa como se deben representar estos sistemas y se usa una nomenclatura bastante entendible y sencilla de identificar.

Para representar la posición del barco en el mapa ésta debe estar referida a un sistema de referencia inercial, S_I , ligado a tierra. Sin embargo, el movimiento de la embarcación se refiere a un sistema de coordenadas, S_R , ligado al barco. Este movimiento está definido por 6 grados de libertad, tres de ellos referidos a la traslación (avance, desplazamiento lateral y arfada) respecto al sistema de coordenadas ligado al barco, y los otros tres a los movimientos de rotación (balanceo, cabeceo y guiñada) del sistema de coordenadas ligado al barco respecto al sistema de coordenadas ligado a tierra [10], como se muestra en la figura 2.1:

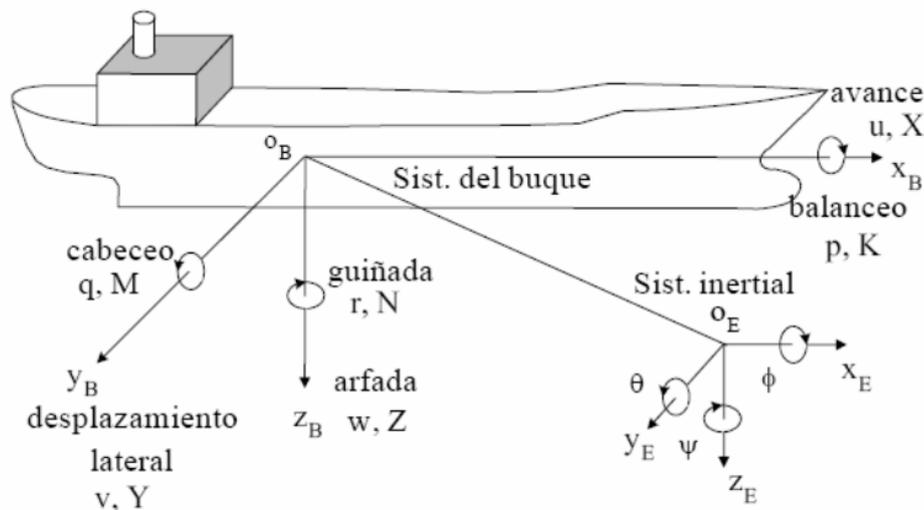


Figura 2.1. Sistemas de referencia global (inercial, S_I) y local (ligado al barco, S_R) [10].

Las velocidades lineales y angulares (avance y giro) se pueden definir en relación al sistema de coordenadas local S_R (ligado al barco). Sin embargo, para representar las fuerzas y momentos ejercidos sobre el barco y la posición y orientación en el plano se utilizará el sistema global de referencia S_I (ligado a tierra) [10].

2.1. Consideraciones y simplificaciones para el sistema de control

La embarcación de la que se va a partir para la realización del modelo, que es la utilizada para el proyecto VNAS, consiste en un catamarán⁵ formado por dos cascos ligeros, unidos mediante una plataforma metálica donde se colocará la caja estanca que aísla la electrónica del medio, y propulsado por dos motores anclados a la misma plataforma metálica junto a cada casco, de forma similar a como se representa en la figura 2.2:

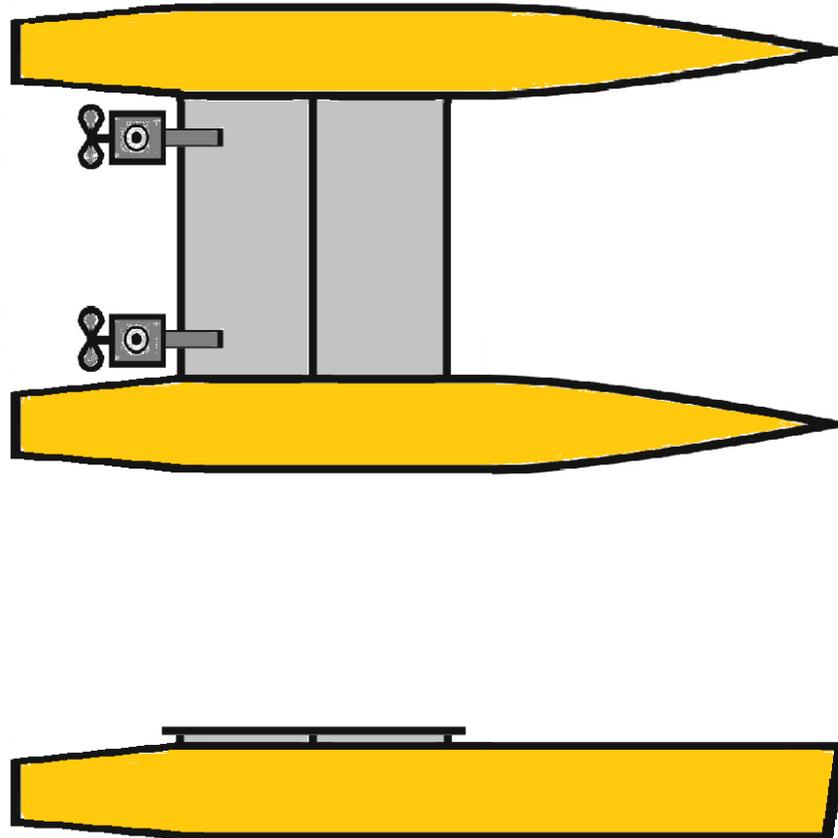


Figura 2.2. Representación de la estructura del catamarán.

Para el diseño del sistema de control del barco se va a utilizar en primera aproximación un modelo sencillo de esta embarcación, considerando los cascos como dos prismas rectangulares, donde supondremos que la masa de todo el conjunto está distribuida por igual entre los dos cascos. Esto simplificará significativamente los cálculos de los parámetros que necesitamos para empezar a diseñar el sistema de control, y nos dará una idea bastante próxima a lo que podríamos ver en la realidad. Aun así, será útil dar opción a modificar todos estos parámetros en el código de programación para que cuando se conozcan definitivamente sean sencillos de sustituir. Así, como se muestra en la figura 2.3, quedaría el modelo tras su simplificación, acompañado de las medidas más significativas en la tabla 2.1:

⁵ A partir de ahora, cuando se esté hablando de catamarán, barco, embarcación, etc., nos estaremos refiriendo al modelo de catamarán propuesto para su estudio.

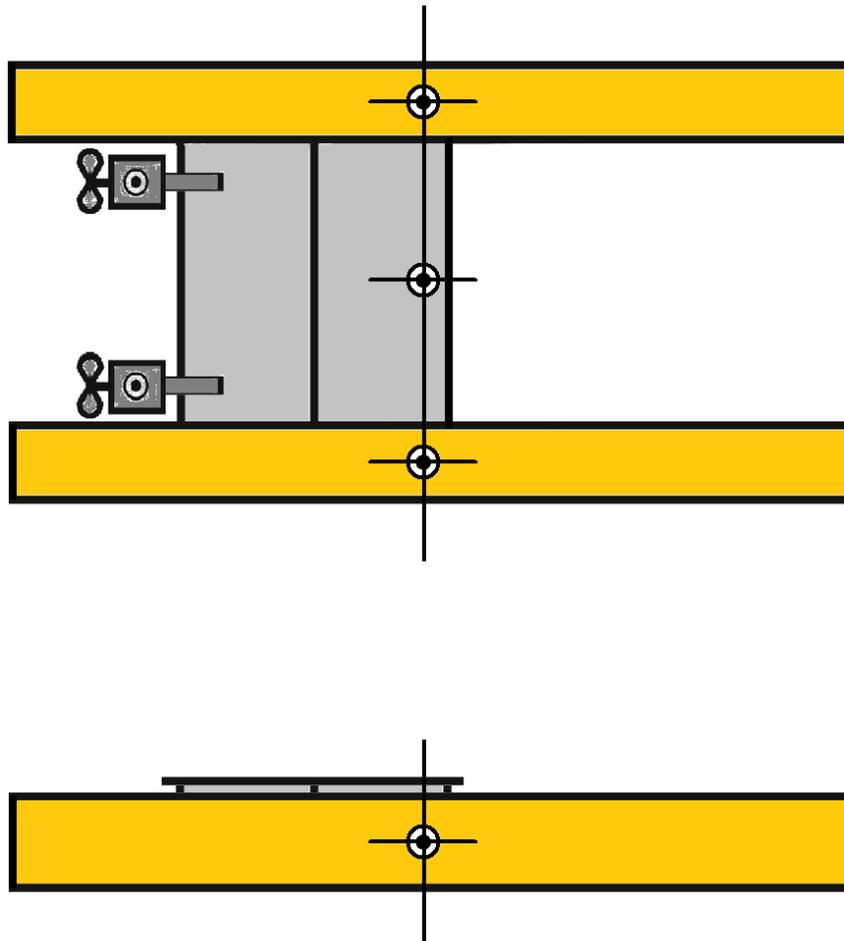


Figura 2.3. Representación simplificada del modelo del catamarán.

COMPONENTE	MEDIDA
Eslora (máx.)	6,5 m
Manga (máx.)	2,3 m
Eslora casco	6,5 m
Manga casco	0,3 m
Altura casco	0,5 m
Calado casco	0,05 m
Distancia entre motores	1,6 m

Tabla 2.1. Medidas adaptadas⁶ para el modelo.

⁶ Se han simplificado las medidas tomadas sobre el catamarán del proyecto VNAS. El esquema con las medidas reales puede verse más detalladamente en el apartado “9. Anexos”.

Representación del modelo

En la realidad, la dinámica de un barco puede compararse a la de un sólido rígido no deformable con tres movimientos de traslación y otros tres de rotación, es decir, con seis grados de libertad en total. Para los modelos mencionados con los que hemos trabajado antes y para el que es objeto de este estudio se han considerado únicamente tres grados de libertad, pues el movimiento se realiza en el plano horizontal. Si se desea describir movimientos de giros y cambios de rumbo, es ineludible la introducción de algunos términos no lineales. Incluso en el caso de grandes buques para transporte de mercancías habría que considerar los movimientos de balance, lo que supondría un modelo de como mínimo 4 grados de libertad, pero los modelos no lineales que surgen según las distintas fuerzas y momentos que se generan por el movimiento sobre el agua, pueden linealizarse para valores cercanos al estado de equilibrio [10].

Siguiendo las consideraciones que se han tenido en apartados anteriores, el esquema básico representado en la figura 2.4 será el correspondiente al sistema físico con el que representamos el barco, sin considerar por ahora perturbaciones como el viento o el oleaje, para un modelo con tres grados de libertad:

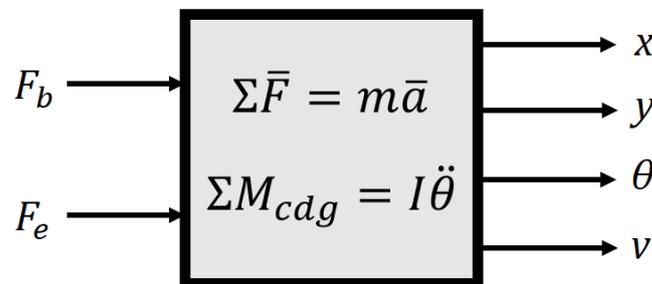


Figura 2.4. Entradas y salidas del sistema físico del modelo del barco.

Como se ha comentado anteriormente, el esquema 3D no es más que una simplificación del esquema 6D en el que no son tenidos en cuenta los ángulos de cabeceo y balanceo, junto con la componente vertical de posicionamiento (arfada), suponiendo que el barco se encuentra en unas condiciones ideales del estado del mar donde la variación de la altura es insignificante respecto al desplazamiento en el plano XY y la variación de los ángulos mencionados anteriormente es despreciable frente a los giros que realiza el barco para orientarse.

Entonces, el esquema de las fuerzas y momentos que actúan sobre el barco se puede representar como en la figura 2.5:

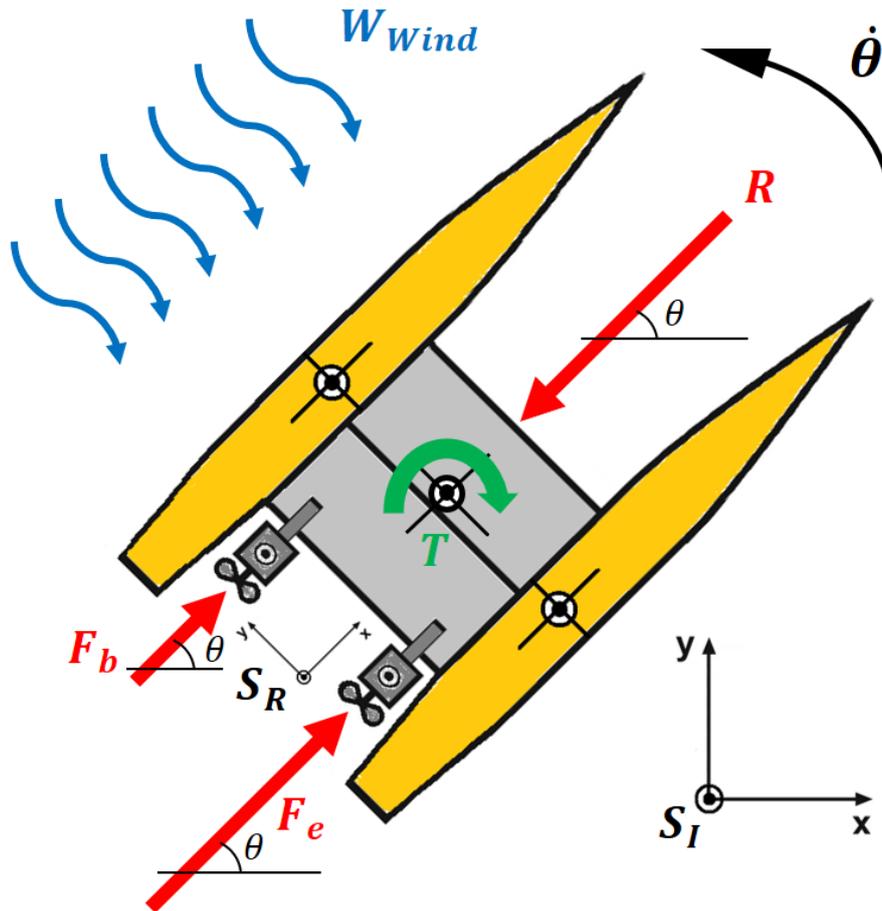


Figura 2.5. Representación de cómo actúan las fuerzas y momentos sobre el casco.

Y las ecuaciones en forma analítica (2. 1), (2. 2) y (2. 3), que se presentarán también en forma matricial al principio del modelo dinámico, quedarían así:

$$(F_e + F_b) \cos \theta - \alpha \dot{x}_{cdg} = M \ddot{x}_{cdg} \quad (2. 1)$$

$$(F_e + F_b) \sin \theta - \alpha \dot{y}_{cdg} = M \ddot{y}_{cdg} \quad (2. 2)$$

$$(F_e - F_b) a - B \dot{\theta} = I \ddot{\theta} \quad (2. 3)$$

A pesar de haber dibujado la silueta completa del barco, hay que recordar que para nuestro modelo se está considerando que el centro de gravedad del barco (a partir de ahora c.d.g.) es donde se aplican todos los esfuerzos y momentos, y parámetros como la geometría no van a ser tratados con precisión por ahora.

Estas ecuaciones, en lo que se refiere a las fuerzas aplicadas, expresan que la diferencia entre la fuerza que ejercen los motores y la fuerza resistente del agua dan como resultado un movimiento uniformemente acelerado del barco en el plano XY. De igual forma, la diferencia entre los momentos generados por los motores y el par resistente generado por el movimiento del casco al girar en el agua produce una variación de la orientación (o una velocidad de giro) en el plano XY.

En lugar de utilizar las velocidades de los motores respecto al sistema de coordenadas local como se indica en las ecuaciones de la cinemática, lo que se obtiene realmente del sistema de control es el voltaje que se suministra a cada uno de los motores, que se traduce en una velocidad de giro de la hélice, que se transmite como un empuje sobre el casco del barco y a su vez hace que éste cambie su posición, que es lo expresan las ecuaciones anteriores. La relación entre el voltaje y la velocidad de giro de las hélices, así como esta velocidad de giro con el empuje de propulsión, se puede considerar lineal, por lo que la relación que nos interesa utilizar es la relación lineal entre el voltaje suministrado a los motores y el empuje de estos sobre el barco.

Cálculo de parámetros

Para describir las ecuaciones que definirán el movimiento y los esfuerzos a los que estará sometido el barco es necesario conocer de antemano ciertos parámetros. Algunos de ellos pueden deducirse a través de cálculos sencillos, y otros los vamos a suponer conocidos, teniendo siempre en cuenta el modelo de barco que se pretende utilizar para el proyecto VNAS. Ya conocemos valores bastante cercanos a la realidad de su eslora, manga y dimensiones de los cascos, pero hay otros parámetros que aún no se pueden conocer con certeza, como es su masa total, su calado, la velocidad máxima de avance, parámetros relacionados con la propulsión de los motores, esfuerzos a los que es sometido, etc. Los parámetros constructivos que vamos a calcular son:

- Masa total del barco:

Será la suma de la masa de todos sus componentes. Estos van a ser los dos cascos, la estructura metálica que los une y hace de soporte, las baterías, los motores y la electrónica embarcada. Haciendo las primeras estimaciones con datos de fabricante y con los datos proporcionados por los compañeros de Navales la masa total del barco será de unos 160 kg.

$$\begin{aligned}
 M &= 2 \cdot M_c + M_e + 2 \cdot M_b + 2 \cdot M_m + M_{ee} = \\
 &= 2 \cdot 20 + 30 + 2 \cdot 25 + 2 \cdot 10 + 20 = 160 \text{ kg}
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

A continuación, en la tabla 2.2 se muestra el peso estimado de cada componente:

COMPONENTE	PESO/UD.	UDS.	PESO TOTAL
Cascos	20 kg	2	40 kg
Estructura de unión y soporte	30 kg	1	30 kg
Baterías	25 kg	2	50 kg
Motores	10 kg	2	20 kg
Electrónica embarcada	20 kg	1	20 kg

Tabla 2.2. Peso de la embarcación por componentes.

- Fuerza propulsora máxima de los motores:

De las especificaciones de los motores para el proyecto VNAS sabemos que cada hélice tiene una fuerza de propulsión máxima de 55 lb, que es equivalente a unos 25 kg, y traducido a unidades del Sistema Internacional para poder trabajar con estos valores quedaría una fuerza de propulsión de unos 250 N por cada motor. Hasta un total de 500 N de fuerza propulsora en la dirección de avance.

Como en un principio se desea que la embarcación no supere los 5 nudos de velocidad, habrá que estimar cual es el valor de fuerza propulsora máximo que se puede alcanzar para que de ninguna manera se rebase este límite.

También es importante aclarar que para los valores de velocidad en los que va a trabajar el catamarán la relación entre el voltaje en bornes de los motores y la velocidad de giro de las hélices (rpm) puede considerarse lineal, como también ocurre con la relación entre la velocidad de giro de las hélices y la fuerza de propulsión de los motores. Por lo que podemos decir que, en régimen estacionario y para las velocidades en las que nos movemos, la relación entre el voltaje y la fuerza de propulsión de los motores seguirá una relación lineal.

Otra de las cosas que hay que tener en cuenta acerca de la propulsión es su relación con el voltaje de alimentación. Como para el VNAS se va a trabajar con motores y baterías de 12 V en continua lo más lógico es adaptar el modelo con estos valores. Para tener la posibilidad de que el barco avance tanto hacia adelante como hacia atrás los motores deberán ir alimentados con un puente H de por medio, lo que permitirá cambiar el sentido de giro de la hélice, haciendo que los voltajes positivos generen un empuje positivo y hagan que el barco avance (forward) y por el contrario los voltajes negativos generen un empuje negativo y el barco se mueva hacia atrás (reverse).

Con estas consideraciones, se supondrá que la propulsión que puede llegar a generar cada uno de los motores es F_e y $F_b \in [-250, 250]$ N, lo que por la condición de proporcionalidad explicada antes supone trabajar con voltajes V_e y $V_b \in [-12, 12]$ V. Estos valores son meramente los límites constructivos del sistema, por lo que veremos más adelante que para el régimen de los 5 nudos requeridos no será necesario alcanzar estos límites.

- Posición y orientación en el plano:

El plano donde se va a mover el barco en las simulaciones se considera sin límites, y los ángulos, tanto el de orientación del barco como el de rumbo, oscilarán entre 0 y 2π , con origen en el eje correspondiente al Norte (eje X). Limitando los ángulos al mismo rango de trabajo se consigue evitar cualquier problema que pueda surgir al operar con ángulos, ya que en un momento dado el barco puede acumular muchas vueltas en un mismo sentido y afectar de forma negativa a los resultados obtenidos de las ecuaciones, haciendo que el sistema responda deficientemente. En los siguientes apartados se explicará más detalladamente el porqué de estas consideraciones respecto al ángulo de orientación.

$$x_{cdg} \text{ e } y_{cdg} \in [-\infty, +\infty] \text{ m} \quad ; \quad \theta \in [0, 2\pi] \text{ rad} \equiv [0, 360]^\circ \quad (2.5)$$

- Coeficientes de resistencia al avance y al giro:

El coeficiente α de resistencia al avance se corresponde con la relación, en un principio supuesta lineal para el modelo, entre la resistencia que el agua ejerce sobre el casco del barco y su velocidad de avance. Esta resistencia puede calcularse mediante la estimación del *Coficiente de Arrastre* [11], y se expresa de la siguiente forma:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad \rightarrow \quad D = C_D \cdot \frac{1}{2}\rho v^2 A \quad (2.6)$$

Si se considera que la superficie que sufre la resistencia se corresponde con la sección del casco sumergida, proyectada en el plano perpendicular al avance, este caso se equipara al avance de una placa plana perpendicular al flujo [12], y el valor de este coeficiente suele tomarse igual a 2. Se ha considerado un calado uniforme para todo el casco de unos 5 cm, ya que, para naves tan ligeras, si se integrara la línea de flotación a lo largo de todo el casco se obtendría un valor medio de calado de entre 3 y 5 cm [12], por lo que consideraremos el caso más desfavorable. Después de esto, llegamos al siguiente resultado para el valor de la resistencia al avance a la velocidad máxima deseada de 5 nudos:

$$D = C_D \cdot \frac{1}{2}\rho v^2 A = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1025 \cdot 2,5722^2 \cdot (2 \cdot 0,3 \cdot 0,05) = 203,45 \text{ N} \approx 200 \text{ N} \quad (2.7)$$

Sabiendo que cuando el barco está parado la resistencia al avance es inexistente y habiendo supuesto una relación lineal entre ambas variables, podemos obtener el coeficiente α directamente:

$$\alpha = \frac{D}{v} = \frac{200 \text{ N}}{2,5722 \text{ m/s}} = 77,75 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}} \quad (2.8)$$

Estos cálculos para obtener la resistencia al avance en función de la velocidad nos sirven para conocer cuál es la potencia máxima que se debe suministrar a los motores para hacer que el catamarán avance a una velocidad máxima de 5 nudos. Como esta velocidad será constante podemos decir que la fuerza de propulsión ejercida por los motores será igual a la resistencia que ejerce el agua sobre el casco del barco, por lo que solo serán requeridos 200 N (100 N por motor) de los 500 N que permiten las especificaciones de los motores (250 N por motor). Con que los motores trabajen al 40 % de su umbral será suficiente para alcanzar el régimen que se requiere, que equivale al rango entre -4,8 y 4,8 voltios. Con estas consideraciones podemos obtener la expresión que define la relación entre voltaje y fuerza de propulsión de cada motor:

$$K_F = \frac{F_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{a}x}} = \frac{100}{4,8} = 20,83 \approx 21 \text{ N/V} \quad (2.9)$$

$$F_b = K_F \cdot V_b \quad ; \quad F_e = K_F \cdot V_e \quad (2.10)$$

El coeficiente B de resistencia al giro se obtendría de forma experimental, suponiendo lineal la relación entre la velocidad de giro y el momento que se opone al mismo. Como por ahora no se dispone del barco para hacer los experimentos supondremos un valor con el que podríamos asumir que el sistema responde de forma realista. Este valor va a ser:

$$B = \frac{T}{\dot{\theta}} = 300 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \quad (2.11)$$

Con el valor de B asumido como correcto, gracias al sistema de control en Simulink podremos saber cuál es la velocidad de giro del barco cuando el momento sea el máximo, es decir, con uno de los motores parado y el otro a máxima potencia. Anticipándonos a la explicación del funcionamiento del sistema de control, obtenemos que los valores límite del momento y de la velocidad angular serán:

$$\text{Para } B = 300 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \quad \rightarrow \quad \dot{\theta} \approx 0,27 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad ; \quad T \approx 81 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2.12)$$

Considerando todo lo anterior, para este modelo de catamarán hemos elegido $\alpha = 77,75$ y $B = 300$, asumiendo que para estos valores es para los que se consigue una velocidad de 5 nudos y un diámetro de giro mínimo de unos 20-25 m en modo autónomo. En las simulaciones se podrá ver si hemos elegido correctamente la forma de obtener estos valores de forma teórica. Estas dos constantes también podrán obtenerse mediante experimentos cuando se bote el barco, de los que se hablará más adelante.

- Momento de inercia del barco:

El momento de inercia I se obtiene a partir de la masa del barco y los parámetros constructivos y geometría del mismo. Con las consideraciones anteriores de tomar el casco como dos prismas rectangulares donde se reparte la masa de manera uniforme, podemos obtener una primera aproximación del momento de inercia del catamarán:

$$I_{\text{casco}} = \frac{M/2}{12} (b^2 + c^2) = \frac{160/2}{12} (6,5^2 + 0,3^2) = 282,27 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (2.13)$$

$$\text{Steiner: } I_{CM} = I_{\text{casco}} + (M/2) \cdot d^2 = 282,27 + \frac{160}{2} \cdot 1^2 = 362,27 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (2.14)$$

$$I_{TOTAL} = 2 \cdot I_{CM} = 2 \cdot 362,27 = 724,54 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \approx 725 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (2.15)$$

Al fin y al cabo no se trata de un valor exacto el que estamos calculando, pero mientras no dispongamos de un análisis más detallado, vamos a considerar que el momento de inercia del catamarán será $I_{TOTAL} = 725 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, para que sea más cómodo trabajar con las ecuaciones, tanto con este valor como con cualquier otro que se haya redondeado.

Por último, comentar que todos estos valores pueden ser corregidos y mejorados haciendo un estudio más detallado de los parámetros de funcionamiento del barco y considerando las variables que actúan en la cinemática y dinámica de la embarcación de forma más precisa, incluso añadiendo nuevas variables al modelo que en primera aproximación se

hubieran considerado con una influencia poco significativa respecto al conjunto de las variables medidas y utilizadas.

2.2. Cinemática

En [2] se puede ver una explicación bastante detallada del modelo cinemático general de un barco, considerando un modelo de embarcación que puede ser simplificado para cualquier otro más sencillo. Como este nivel de precisión se escapa de los objetivos de este trabajo, aquí solo nos vamos a centrar en el modelo más simple de un barco propulsado por dos motores fijos que funcionan de forma diferencial para dotar a la nave de capacidad para maniobrar.

En este caso, el que interesa es el modelo diferencial, ya que la embarcación propuesta no va a disponer de timón y tanto la propulsión como el direccionamiento son tarea de los motores, independientes el uno del otro. Las ecuaciones de la cinemática buscarán obtener las velocidades referidas al S_R , en ejes ligados al barco, y también la velocidad de giro (cambio de orientación) [2].

En nuestro sistema se propone simplificar los cálculos a un único punto, que será el c.d.g. del barco, y sobre el que se aplican los esfuerzos y momentos a excepción de la propulsión de los motores, que se considera cada una a un lado del c.d.g. y que generarán un momento sobre el mismo. Es por esto que algunas de las constantes del sistema se habrán de obtener o corregir de forma experimental, pero teniendo la posibilidad de hacer estimaciones fiables de forma teórica. A esto ayudará el diseño del simulador, del que se mostrará su funcionamiento más adelante.

Como se ha mencionado antes, los sistemas reales tienen 6 grados de libertad, pero para este caso se va a suponer el modelo más simple, que permite representar su posición (x e y) y orientación (o ángulo de guiñada, al que se representará como θ) respecto a un sistema de referencia ligado a tierra. En principio es suficiente con un sistema con únicamente 3 grados de libertad, basado en un modelo plano de la superficie del agua, en el que las variaciones en z (movimiento de arfada) serán despreciables, y los movimientos que producen las olas y el viento haciendo que la embarcación gire alrededor de los ejes X e Y (movimientos de balanceo y cabeceo) se pueden suponer también muy pequeños y/o lentos en comparación con los cambios de rumbo del barco. Todo esto suponiendo que se va a trabajar en aguas en calma y la interacción entre la superficie mojada del casco y el agua es uniforme como principales consideraciones.

Si asumimos un sistema de referencia S_R localizado en el c.d.g. del barco como se ha mencionado antes, es decir, en ejes ligados al barco, y un sistema de referencia inercial S_I , o lo que es lo mismo, en ejes ligados a tierra localizado en algún lugar del mapa, “la posición y orientación de la embarcación se pueden especificar al ubicar un punto P de la misma respecto a este sistema de referencia inercial” [2]. Con todo esto, de forma simplificada, la posición y orientación del barco se puede expresar en forma de vector como

$$\xi_I = [x \ y \ \theta] \quad (2.16)$$

donde x será la coordenada con dirección Norte-Sur, y será la coordenada con dirección Este-Oeste y θ indicará la orientación del barco en el ese punto en el plano, lo que permitirá saber en cada instante cual es la dirección que está siguiendo.

Por medio de la matriz de rotación ortogonal podemos establecer la relación entre los sistemas de coordenadas local y global [2], lo que será útil para describir el movimiento del barco, y también a la hora de trabajar con las ecuaciones de la dinámica. La matriz de rotación se puede expresar de la siguiente forma:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Y la velocidad del barco en los dos sistemas se relaciona de la siguiente forma:

$$\dot{\xi}_R = R(\theta) \dot{\xi}_I \quad (2.18)$$

Como ejemplo, vamos a considerar primero el modelo para un robot propulsado por dos ruedas equidistantes del c.d.g. del sistema y de radio r , representado en la figura 2.4:

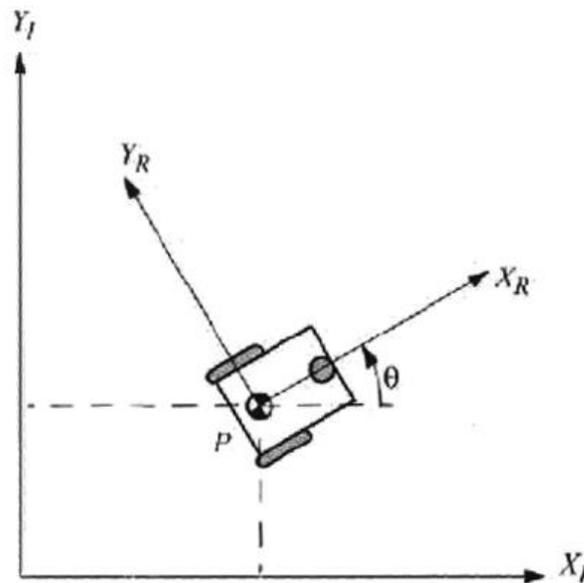


Figura 2.6. Robot propulsado de forma diferencial por dos ruedas [2].

“Dado un punto P centrado entre las dos ruedas motrices, y a una distancia l de cada una de éstas, conocida la velocidad de rotación de cada una de estas ruedas $\dot{\varphi}_i$ y $\dot{\varphi}_d$, el modelo cinemático del robot debería establecer su velocidad respecto al sistema de referencia global S_I . Podemos calcular el movimiento del robot en el sistema de referencia global a partir del conocimiento del movimiento del robot en el sistema de referencia del robot (S_R). Por lo tanto, la estrategia consistirá en calcular en primer lugar la contribución de cada una de las dos ruedas al movimiento en el sistema de referencia local $\dot{\xi}_R$ ” [2]. Entonces, la velocidad de avance en el sistema de referencia local se define como la combinación de las velocidades que cada rueda genera sobre el sistema:

$$\dot{x}_R = \frac{r}{2} (\dot{\varphi}_i + \dot{\varphi}_d) \quad (2.19)$$

Como es de esperar, si las ruedas giran al mismo régimen de revoluciones pero en sentido contrario el robot girará sobre sí mismo, sin variar su posición en el plano. Como ninguna de las ruedas contribuye al movimiento del robot en sentido vertical respecto sus ejes, esta será siempre nula. La componente que nos queda será la velocidad de giro, que se obtiene de manera análoga a la velocidad de avance:

$$\dot{\theta}_R = \frac{r}{2l}(\dot{\varphi}_i - \dot{\varphi}_d) \quad (2.20)$$

Esta expresión viene de operar con los momentos que generan cada una de las ruedas sobre el cdg del robot al encontrarse a una distancia l del mismo. Más adelante también se trabajará en base a ella para obtener las ecuaciones diferenciales que definen el movimiento de la embarcación. Así, la expresión para el comportamiento cinemático para los dos sistemas de referencia puede obtenerse de esta expresión:

$$\dot{\xi}_l = R(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{r}{2}(\dot{\varphi}_i + \dot{\varphi}_d) \\ 0 \\ \frac{r}{2l}(\dot{\varphi}_i - \dot{\varphi}_d) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Para representar el modelo cinemático del barco, tanto el directo como el inverso, se puede utilizar un método parecido al que se usa con estos robots móviles con ruedas, pero realmente se estará trabajando con la velocidad de los dos motores en el plano en el que se mueve el barco. Las expresiones a las que se llega en [2] son las siguientes:

$$\begin{bmatrix} v_{me} \\ v_{mb} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -a \\ 1 & 0 & a \\ 0 & 1 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

De donde obtenemos que:

$$v_{me} = \dot{x} - a\dot{\theta} \quad (2.23)$$

$$v_{mb} = \dot{x} + a\dot{\theta} \quad (2.24)$$

Y la forma en cinemática directa quedaría entonces de la siguiente forma:

$$\dot{x} = \frac{v_{me} + v_{mb}}{2} \quad (2.15)$$

$$\dot{y} = 0 \quad (2.26)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v_{mb} - v_{me}}{2a} \quad (2.27)$$

En la expresión de la velocidad de giro, la a en el denominador se refiere a la distancia entre el c.d.g. de la embarcación y el punto de aplicación de la fuerza, considerando que los puntos donde aplican las fuerzas los motores y el punto donde se encuentra el c.d.g. forman una línea recta que pasa por los tres puntos. Esta distancia corresponde con la mitad del ancho del barco (en el ejemplo del robot se correspondía con l , en el barco con a), y es simétrica para ambos motores en el modelo considerado.

Cabe resaltar que únicamente con las expresiones anteriores no se puede obtener una fórmula que defina como se va a mover el barco en el plano dada la disposición de los motores y la velocidad de cada uno de ellos [2]. Será necesaria también la expresión de la dinámica del barco para poder establecer un modelo completo en el que también se añadan las fuerzas y momentos a los que está sometido.

2.3. Dinámica

Desarrollar un modelo matemático capaz de responder de manera efectiva ante perturbaciones externas es uno de los desafíos que se encuentra este estudio. Además, debe explicar de manera realista cómo se comporta el barco en las situaciones propuestas. Teniendo en cuenta que prácticamente ningún sistema responde únicamente a comportamientos lineales es importante saber los términos que van a hacer que el modelo presente no linealidades, que en nuestro caso será los cambios de rumbo, entre otros [10].

Recordando lo mencionado en el apartado anterior, esta es la nomenclatura que se va a usar para definir las ecuaciones dinámicas del barco [2],

- Posición⁷: $\xi = (x, y, z, \theta, \psi, \phi)'$ \rightarrow guiñada: θ ; cabeceo: ψ ; balanceo: ϕ
- Velocidad: $\dot{\xi} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\theta}, \dot{\psi}, \dot{\phi})'$
- Aceleración: $\ddot{\xi} = (\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}, \ddot{\theta}, \ddot{\psi}, \ddot{\phi})'$

de los que solo usaremos los términos correspondientes a la posición en x e y , y la orientación o ángulo de guiñada θ .

En [2] también se explica para el caso más general la ecuación de la dinámica, pero para los cálculos que requerimos no es necesario llegar a ese nivel de complejidad, manteniendo nuestra hipótesis de trabajar con 3 grados de libertad. La ecuación principal de la dinámica que nos describe el movimiento del barco y a partir de la cual se desarrolla el modelo es la siguiente,

$$M = F - R \quad (2.28)$$

donde M es una matriz de masas e inercias, R es una matriz que nos describe los momentos y fuerzas que se generan por el movimiento del barco, y que para nuestro modelo la interpretaremos como la resistencia que el fluido ejerce sobre el barco, debida a su movimiento por el agua, y F es la matriz de fuerzas y momentos aplicados sobre el barco, que corresponde

⁷ El consenso al que se ha llegado internacionalmente es el de llamar a los ángulos ψ *yaw* (guiñada), θ *pitch* (cabeceo), y ϕ *roll* (balanceo), pero para este trabajo, al solo considerar 3D (tres grados de libertad), se llamará a *yaw* (guiñada) con el ángulo θ , y será el correspondiente al movimiento del barco en el plano XY.

en nuestro caso únicamente con la propulsión de los motores. En el modelo simplificado la expresión matricial de la dinámica del barco quedaría de la siguiente manera:

$$M = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M\ddot{x} \\ M\ddot{y} \\ I\ddot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$R = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha\dot{x} \\ \alpha\dot{y} \\ B\dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$F = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_F(V_e + V_b) \\ K_F(V_e + V_b) \\ K_F(V_e - V_b) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot K_F(V_e + V_b) \\ \sin \theta \cdot K_F(V_e + V_b) \\ a \cdot K_F(V_e - V_b) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (F_e + F_b) \cdot \cos \theta \\ (F_e + F_b) \cdot \sin \theta \\ (F_e - F_b) \cdot a \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Peso aparente

El barco flotará sobre la superficie del agua según el principio de Arquímedes. Las ecuaciones que hay que contemplar son entonces la del peso del volumen del fluido desplazado, $E = \rho g V$, y el propio peso del barco, $W = Mg$. En ocasiones se utiliza el volumen de fluido desplazado junto a la velocidad de avance deseada para hacerse una idea de la potencia que se requiere en los motores para alcanzar esa velocidad. Por ahora, el calado del barco lo vamos a estimar, ya que aún no tenemos datos exactos de flotabilidad. En conversaciones mantenidas durante las reuniones del proyecto VNAS se estimó que el calado del barco no sobrepasaría los 5 cm, por lo que tomaremos este valor como el calado de forma uniforme en todo el casco, y así poder hacer los cálculos que procedan.

De la parte de diseño de la estructura, disposición de equipos y flotabilidad se encarga la ETSINO de la UPCT, por lo que consideraremos en un principio que estos valores conocidos y cuando puedan ser proporcionados se volverán a recalcular tanto estos datos como los apartados que lo requieran.

Propulsión

La fuerza de propulsión se representa como la composición de dos fuerzas en la disección del avance, que harán que el barco avance y lo dotará de la maniobrabilidad deseada. Para nuestro modelo supondremos, como se ha comentado antes, que la fuerza se aplica a la misma altura que donde hemos considerado el c.d.g. del barco, para simplificar los cálculos.

Resistencia

En teoría, la resistencia que ejerce el agua sobre el casco del barco está relacionada con el cuadrado la velocidad de la embarcación [2], donde se deben tener en cuenta la superficie en contacto con el agua, un coeficiente de resistencia, y un coeficiente relacionado con la influencia de la forma del casco en el deslizamiento del fluido en contacto con su superficie.

Para nuestro modelo se ha supuesto desde un principio que la relación entre la resistencia al avance y la velocidad se puede expresar mediante una constante, es decir, una relación lineal. Para obtener valores más precisos “habría que modelarlo teniendo en cuenta la variación de la

superficie mojada, los coeficientes deberían variar según los ejes, y para los momentos habría que buscar una fórmula mejor” [2].

2.4. Posicionamiento

Es posible emplear distintos sistemas de coordenadas, dependiendo del punto que queramos utilizar como referencia y de la configuración del espacio en el que queramos representar nuestro sistema [2]:

- Sistema de coordenadas local. Lo localizamos en el c.d.g. del barco. Su configuración consiste en un sistema con el eje X hacia la proa, el eje Y hacia babor y el eje Z hacia arriba, este último sin influencia.
- Sistema de coordenadas global. Se trata de un sistema de referencia inercial, ligado a un punto del mapa, con el eje X señalando hacia el Norte, el eje Y hacia el Oeste y el eje Z hacia arriba. La orientación se expresa en forma de ángulos, balanceo (ϕ), cabeceo (ψ) y guiñada (θ) alrededor estos ejes respectivamente, siguiendo la regla de la mano derecha (sentido antihorario tomado como positivo), que además son los que hacen posible la transformación de coordenadas del sistema de referencia local al global.
- Sistema de coordenadas UTM⁸. Se trata de un sistema de coordenadas más estandarizadas, que además son las que emplean los sistemas GPS. En este sistema el eje X se corresponde con el *easting*, el eje Y con el *northing*, y el eje Z con la altitud.

Por ahora, nuestro objetivo no es determinar las medidas de posición y velocidad a partir de los datos del GPS⁹, ni los datos de la orientación ni del rumbo a partir de las medidas del INS¹⁰, por lo que no tendremos que usar aún el sistema de coordenadas UTM. Como toma de contacto, para poder localizar el barco en el plano y para realizar las simulaciones vamos a utilizar el segundo sistema mencionado, considerando el eje x como el Norte y el eje y como el Oeste, lo que servirá también a la hora de tener en cuenta la dirección de las perturbaciones como el viento y el oleaje.

En el caso de que se quisiera trabajar en un sistema de coordenadas UTM existen métodos de conversión directos [9] para los datos obtenidos del receptor GPS, que traduce las coordenadas geodésicas WGS84¹¹ (longitud, latitud y altitud) en coordenadas UTM. Así, en el caso de que se recibieran los datos de un sistema GPS y un sistema inercial de navegación (INS), las únicas modificaciones que serían necesarias consistirían en girar nuestro sistema de referencia global 90° para hacer coincidir de ambos sistemas. Esta información será útil cuando se requiera implantar el sistema de control en el barco de forma real, para que sea compatible con las medidas que va a recibir de los instrumentos embarcados.

A la hora de representar todos estos datos en nuestras simulaciones, no se va a tener en cuenta la posición relativa que pueda tener la instrumentación respecto al c.d.g. del barco, y como primera aproximación puede suponerse que todos estos puntos relevantes se concentran exactamente en el c.d.g. del barco, lo que por ahora simplifica enormemente estos cálculos.

⁸ Universal Transverse Mercator (Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator).

⁹ Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global).

¹⁰ Inertial Navigation System (Sistema de Navegación Inercial).

¹¹ World Geodesic System 84 (Sistema Geodésico Mundial 1984).

3. Desarrollo y funcionamiento básico del sistema de control

Una vez conocidos los parámetros y variables que se van a tener en cuenta en todos los cálculos, de aquí en adelante se puede empezar a modelar el sistema físico del barco, y más tarde, el sistema de control que hará que el barco se mueva de forma autónoma.

Para empezar, vamos a describir el esquema básico del sistema de control, cuáles son las señales que el sistema utiliza y controla, y cuál será la secuencia de funcionamiento del conjunto a modo general, así como las consideraciones que se han ido requiriendo conforme se avanzaba en el diseño.

3.1. Proceso de diseño

El primer esquema del sistema de control que se obtiene es el del sistema físico del barco, con entrada “potencia de los motores” y salida “posición”, “orientación” y “velocidad” instantáneas. Conociendo estas variables de las ecuaciones de la dinámica del barco se puede plantear este primer esquema de forma sencilla, representado en la figura 3.1:

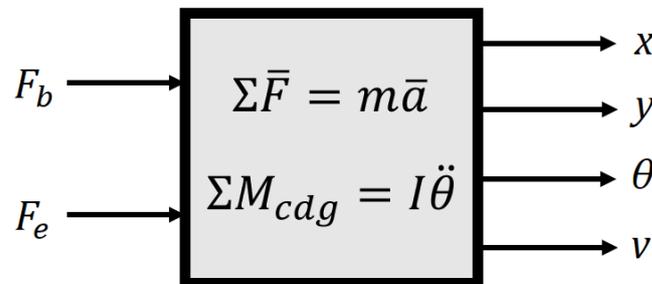


Figura 3.1. Entradas y salidas del sistema físico del modelo.

Con esta idea y con las ecuaciones (2. 1), (2. 2) y (2. 3) del apartado anterior, ya se puede diseñar en Simulink el primer esquema de del control del barco (figura 3.2), propulsado y dirigido por dos motores, con el que se puede comprobar que las ecuaciones planteadas responden correctamente a las entradas generadas:

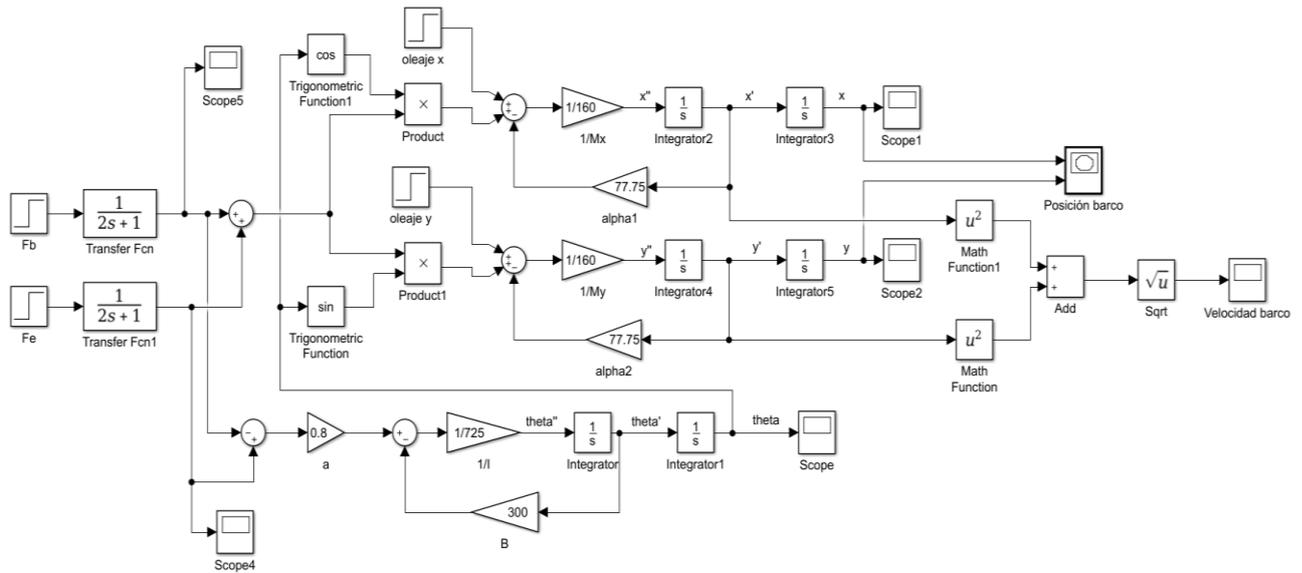


Figura 3.2. Sistema físico del modelo propuesto en Simulink.

Como puede observarse, se ha tenido en cuenta la influencia de fuerzas externas, correspondientes con el viento y el oleaje, por lo que en esencia este sistema explica con claridad el comportamiento de cualquier cuerpo propulsado sometido a un rozamiento y a una perturbación. Sabiendo cual es la magnitud de esa propulsión se puede conocer su posición y orientación en todo momento.

Para nuestro caso en concreto, el diagrama de bloques representado corresponde a las ecuaciones que describen el movimiento del barco en el agua, propulsado por dos motores, equidistantes al c.d.g., uno en cada lado del catamarán, que en su contra tiene la fuerza de resistencia que ejerce el agua, tanto en el avance como en los giros, pero como los motores son capaces de vencer esta resistencia y otras perturbaciones para los valores de velocidad con los que trabajamos, el barco es capaz de avanzar, pudiendo obtener de las ecuaciones planteadas su posición y orientación en todo momento.

Como se habló en apartados anteriores, en el sistema propuesto hay constantes que deberían obtenerse de forma experimental, ya que pueden depender de las dimensiones y geometría del casco, de las propiedades del agua, de efectos relevantes no considerados en las ecuaciones, etc., pero en primera aproximación podemos obtener estos valores por medio de las especificaciones de los componentes como se ha hecho en los apartados anteriores, intentando así que no difieran mucho del valor real a obtener mediante ensayos. Al fin y al cabo, el funcionamiento de este sistema es igual que el de un barco que es gobernado por alguien a bordo, utilizando la diferencia de potencia de los motores para controlar el rumbo.

Una vez claro lo anterior, el siguiente paso es conseguir que estas potencias sean reguladas por un sistema de control capaz de calcularlas a partir de conocer la posición instantánea del barco, el *Waypoint*¹² al que se quiere llegar y la velocidad de consigna con la que queremos que se mueva el catamarán. La figura 3.3 muestra la primera idea con la que se empieza a diseñar el sistema de control con entrada “posición final” y salida “posición instantánea”, realimentada hacia la entrada para cerrar el lazo:

¹² *Waypoint*: punto de destino.

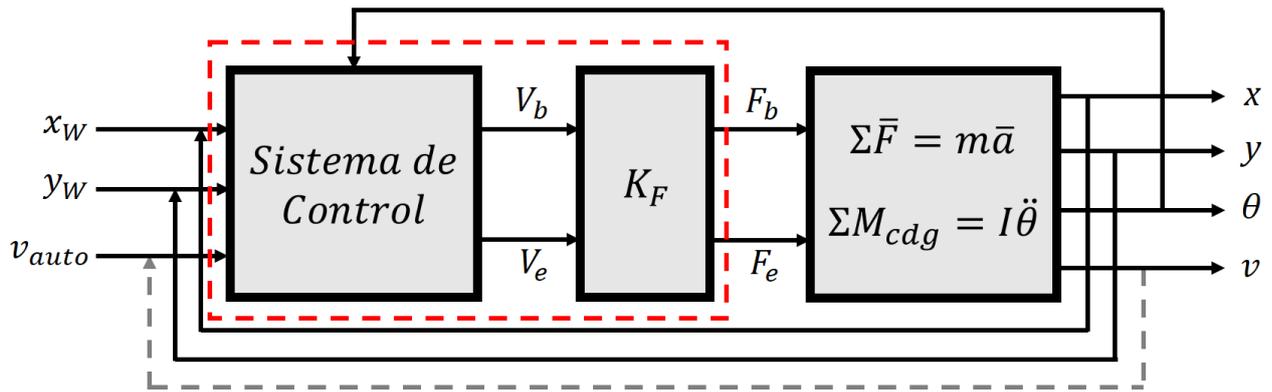


Figura 3.3. Primera idea para el desarrollo del sistema de control.

En la figura 3.4 se puede ver cómo quedaría este planteamiento en Simulink, pero con la parte de control del rumbo aun por desarrollar:

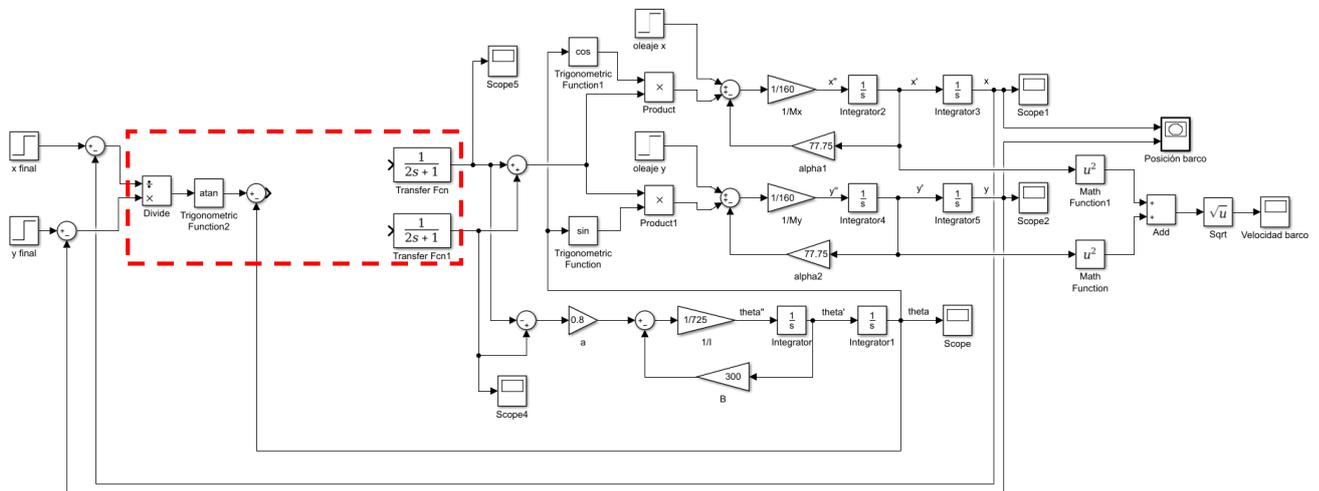


Figura 3.4. Primera idea para el desarrollo del sistema de control en Simulink.

El recuadro rojo de las figuras 3.3 y 3.4 indica la posición del sistema de control en nuestro diseño. También se ha representado la realimentación de la velocidad del barco hacia la velocidad de consigna para compararlas, pero el hecho de estar dibujada en líneas discontinuas quiere decir que se va a estudiar cómo afecta el control de la velocidad en lazo abierto o en lazo cerrado.

Ahora, el siguiente punto a desarrollar es el diseño de la parte que controla las correcciones del giro mediante la propulsión de los motores de forma diferencial, al que también se le deberá añadir una condición para saber en qué momento alcanza su destino y una secuencia para decidir el giro óptimo, es decir, el que menor distancia requiera para realizarlo. A continuación, se enumeran las consideraciones que hay que tener en cuenta en el proceso de diseño del sistema de control:

- **Control para alcanzar el *Waypoint***

El objetivo de esta parte es ir desde a una posición inicial a una posición final, a la que de ahora en adelante llamaremos *Waypoint* o W . En los sistemas de localización GPS que se utilizan normalmente en navegación la posición del barco en el mundo se define por su latitud (ϕ), longitud (λ) y altura (h). Dada una posición arbitraria del barco $B(\phi_B, \lambda_B, h_B)$ y la del *Waypoint* $W(\phi_W, \lambda_W, h_W)$, la tarea del controlador consiste en encontrar el rumbo ξ que permite al barco llegar a W . Todos estos cálculos tienen lugar en un sistema de coordenadas esféricas, acorde a la forma del globo terrestre y las posiciones se obtienen por satélite, pero en el desarrollo de nuestro modelo nos quedaremos en un sistema de coordenadas inercial como el que se menciona en apartados anteriores.

Como es prácticamente imposible que el barco alcance exactamente W , habría que considerar un margen de error en la llegada que permita saber que se ha alcanzado el destino, en la forma $\sqrt{x^2 + y^2} < R_w$. Con esta condición lo que se hace es considerar que el punto de destino no es solamente un punto, sino un área de forma circular y de radio R_w con centro en el punto de destino W , como se muestra en la figura 3.5:

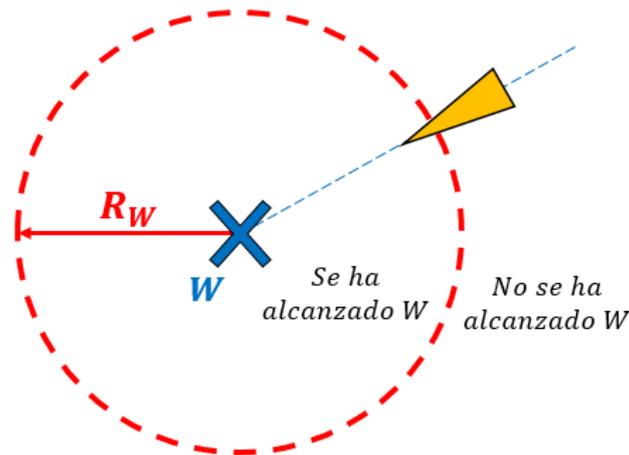


Figura 3.5. Representación de cómo se alcanza el *Waypoint*.

La pregunta que surge ahora es, ¿cómo debe funcionar el sistema de control? De forma breve se podría decir que la respuesta del sistema se manifiesta de la siguiente forma:

- 1) Se introduce la velocidad de consigna a la que se quiere que avance el barco y la posición final a alcanzar, es decir, el *Waypoint*.
- 2) El sistema de control comparará el *Waypoint* con la posición en cada instante, supuesta conocida.
- 3) El barco se debe orientar para ir de la forma más recta posible hasta el punto de destino.
- 4) Cuando el sistema de control considera que el barco ha alcanzado W el barco ralentiza su movimiento o se para, a la espera de recibir nuevas órdenes desde el *Waypoint*, momento en el que se convertirá en el próximo punto de inicio.

- **Control del avance y mantención del rumbo**

Suponiendo que las condiciones iniciales (posición y orientación) del barco serán siempre conocidas, el objetivo principal consiste en que, introduciendo una posición de destino,

la embarcación sea capaz de dirigirse con los motores de forma diferencial para alcanzar dicha posición mediante la medición del error de orientación, haciendo que éste tienda a cero, a la vez que se evalúa de igual manera y en todo momento el error de posición para saber el instante en el que el barco alcanza el *Waypoint*. Usando para los puntos referidos al barco el subíndice “cdg”, y para los puntos referidos al *Waypoint* se usará “w” se tienen las siguientes expresiones:

$$x_{cdg} \rightarrow x_w \quad ; \quad y_{cdg} \rightarrow y_w \quad ; \quad \theta_{cdg} \rightarrow \theta_w$$

$$e_x = x_w - x_{cdg} \rightarrow 0 \quad ; \quad e_y = y_w - y_{cdg} \rightarrow 0 \quad ; \quad e_\theta = \theta_w - \theta_{cdg} \rightarrow 0$$

Con esta nomenclatura se quiere expresar que tanto el error de posición como el de orientación deben tender a hacerse cero, lo que indicará que el barco ha alcanzado su objetivo y lo ha hecho siguiendo el camino más corto. Esto cambia totalmente el primer planteamiento solo con el sistema físico del barco, en el que se alcanzaba *W* mediante el control manual de la potencia a los motores. Como ahora las entradas no van a ser las impulsiones de los motores, será necesario prefijar la velocidad lineal a la que se quiere que avance el barco, y a partir de esta se tendrá la combinación de fuerzas de los motores que la hace posible.

Para mantener la velocidad a la vez que se controla el rumbo se deben controlar simultáneamente el error de posición y el error de orientación, a los que denominaremos con la siguiente notación:

$$e_d = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} \quad ; \quad e_\theta = \theta_w - \theta_{cdg}$$

El error de posición servirá para proporcionar un voltaje nominal, que por norma general tendrá valor constante hasta que alcance el *Waypoint* y empiece a disminuir para hacer que el barco se quede en torno a éste. El error de orientación nos dará el voltaje de corrección que habría que aplicar a los motores para que sean capaces de hacer que el barco gire. En la siguiente figura 3.6 se muestra el esquema de control de esta parte:

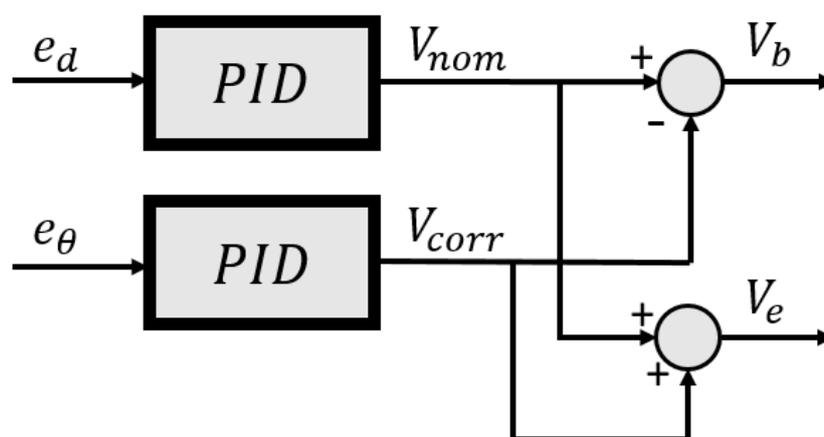


Figura 3.6. Control para la mantención de velocidad y rumbo.

A pesar de haber representado PIDs en la figura 3.6, por ahora el control que se va a hacer es proporcional entre los errores de posición y orientación y los voltajes nominal y de corrección

respectivamente. Este control proporcional también responderá a una serie de condiciones en las que no se entrará en detalle, como bloques saturadores, para evitar que se sobrepasen los voltajes requeridos y se dañe el sistema, y bloques condicionales, donde se evaluarán en las señales de entrada, haciendo que la relación entre la entrada y la salida varíe según el valor de la entrada. Las ecuaciones que explican el diagrama de la figura anterior son las siguientes,

$$V_{nom} = K_{Vn}(e_d) \cdot e_d \quad (3.1)$$

$$V_{corr} = K_{Vc}(e_\theta) \cdot e_\theta \quad (3.2)$$

$$V_e = V_{nom} + V_{corr} \quad (3.3)$$

$$V_b = V_{nom} - V_{corr} \quad (3.4)$$

donde $K_{Vn}(e_d)$ y $K_{Vc}(e_\theta)$ son constantes que dependerán de las condiciones de llegada al destino y de las condiciones de mantención de rumbo.

- **Criterio de selección del ángulo óptimo de giro**

Es lógico pensar que una vez que se le da al barco el *Waypoint* tendrá dos formas orientarse hacia el destino: girando en sentido horario o en sentido antihorario. El giro que se desea realizar es el que ocupe menos tiempo, y por tanto menos distancia, lo que significa que es necesario desarrollar sobre el sistema de control un algoritmo que capacite al barco para realizar el giro que le permita orientarse para alcanzar W , virando el menor ángulo posible, y optimizando así el desplazamiento.

Para orientar el barco se ha de valorar cuál es el ángulo más pequeño que el barco tendría que girar para conseguir una orientación paralela a la línea que une su posición en ese instante con la posición final. Es ahora cuando definimos un nuevo parámetro: el rumbo que debe seguir el catamarán para alcanzar W de la forma más recta posible, al que llamaremos ξ y lo definiremos como se ve en la ecuación 3.5:

$$\xi = \text{atan} \frac{y_w - y_{cdg}}{x_w - x_{cdg}} = \text{atan} \frac{e_y}{e_x} \quad (3.5)$$

Este es el ángulo del rumbo que debe seguir el barco para que el camino que realice sea lo más recto posible. En el punto anterior se ha mencionado el error de orientación de forma genérica, pero para que sea más fácil de interpretar, a partir de ahora se va a usar la siguiente notación:

$$e_\theta = \theta_w - \theta_{cdg} \rightarrow e_\theta = \xi - \theta$$

El valor de e_θ oscilará entre los valores -2π y $+2\pi$, y evaluarlo permitirá elegir en qué dirección se realizaría el giro óptimo. Para ello, se debe añadir una nueva parte al sistema de control que evalúe cómo debe ser este giro. Considerando que F_e se refiere al motor de estribor y F_b al de babor, partimos de la siguiente hipótesis:

- Si $e_\theta = \xi - \theta < 0$ && $|e_\theta| \in [0^\circ, 180^\circ) \equiv [0, \pi) \rightarrow F_e < F_b$
- Si $e_\theta = \xi - \theta < 0$ && $|e_\theta| \in [180^\circ, 360^\circ) \equiv [\pi, 2\pi) \rightarrow F_e > F_b$
- Si $e_\theta = \xi - \theta > 0$ && $|e_\theta| \in [0^\circ, 180^\circ) \equiv [0, \pi) \rightarrow F_e > F_b$
- Si $e_\theta = \xi - \theta > 0$ && $|e_\theta| \in [180^\circ, 360^\circ) \equiv [\pi, 2\pi) \rightarrow F_e < F_b$
- Cuando $e_\theta \rightarrow 0 \rightarrow F_e - F_b \rightarrow 0$

En la figura 3.7 se representa como respondería ante este planteamiento el barco cuando se encuentra en el primero de los cuatro casos posibles:

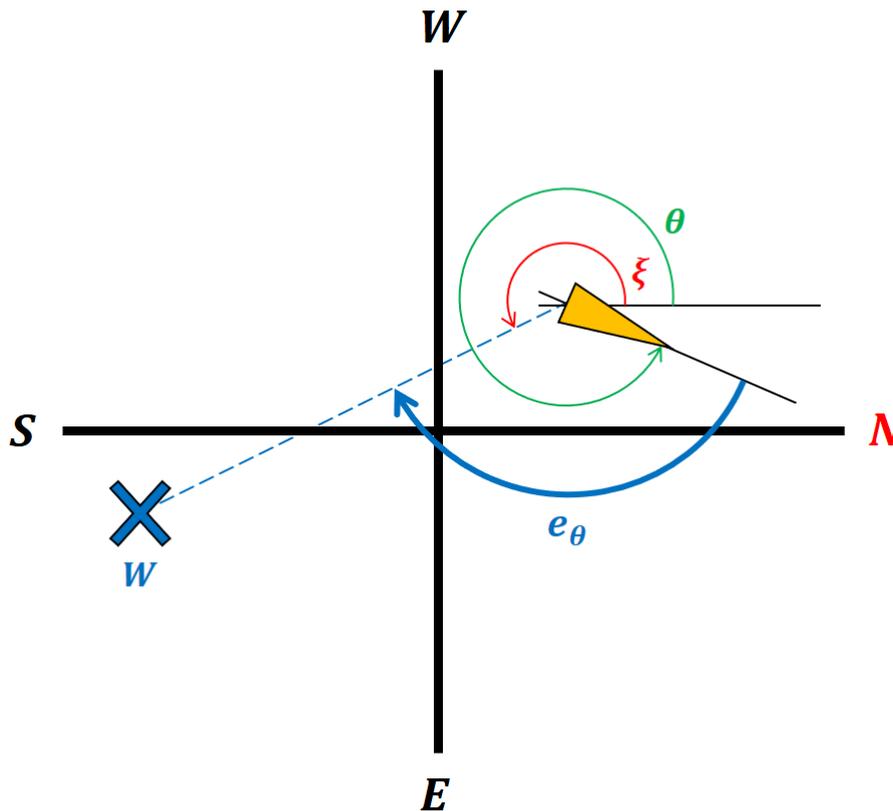


Figura 3.7. Ejemplo de selección del giro óptimo.

Lo que se consigue haciendo que se cumplan estas condiciones de impulsión en los motores es que siempre se opte por el camino más corto y, además, cuando se ha alcanzado el rumbo deseado, este es corregido siguiendo el mismo principio de recorrido óptimo en torno a la línea que une su posición en ese instante con el *Waypoint*, dando la sensación de que el barco serpentea en torno a una línea.

- **Criterio de selección del ángulo óptimo de giro y modificaciones que son necesarias hacer en MATLAB para que sea posible**

Como hemos dicho antes, en el modo de funcionamiento autónomo la velocidad deberá ser seleccionada manualmente, la propulsión generada por esta velocidad de consigna será combinación de la potencia de los dos motores, y su orientación en cada instante dependerá de las variaciones de potencia entre los motores, con las siguientes conclusiones:

- Conforme $e_\theta = \xi - \theta \rightarrow 0 \Rightarrow F_e - F_b \rightarrow 0$
- Cuando $e_x = x_w - x_{cdg} \rightarrow 0$ & $e_y = y_w - y_{cdg} \rightarrow 0 \Rightarrow F_e \approx F_b \rightarrow 0$
- Podemos considerar que se ha alcanzado el *Waypoint* cuando nos encontramos a una distancia suficientemente cercana a él, como puede ser 15m, 20m, 25m..., en la forma:

$$e_d = \sqrt{(x_w - x_{cdg})^2 + (y_w - y_{cdg})^2} = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} < R_w$$

Entonces, resumiendo las hipótesis anteriores, nuestro objetivo será el siguiente:

$$e_x = x_w - x_{cdg} \rightarrow 0 \quad ; \quad e_y = y_w - y_{cdg} \rightarrow 0 \quad ; \quad e_\theta = \xi - \theta \rightarrow 0$$

El principal problema que nos encontramos es que tenemos que trabajar con ángulos, que para nosotros tomarán valores entre 0 y 2π . Estos ángulos han de obtenerse en algunos casos, más concretamente el ángulo del rumbo ξ a seguir, por medio de la función $\text{atan}(u)$, pero en MATLAB esta función solo da como solución ángulos comprendidos entre $-\pi/2$ y $\pi/2$, ya que no tiene en cuenta a que se debe el signo de la función $\text{atan}(u)$, si al numerador ($y_w - y_{cdg}$) o al denominador ($x_w - x_{cdg}$), o lo que es lo mismo, toma como norma general que el signo, ya sea positivo o negativo, forma parte del numerador, por lo que el resultado de la función $\text{atan}(u)$ siempre será un ángulo contenido en el primer o cuarto cuadrante. Esto se ve claramente en que, sin introducir ninguna condición más, cuando se asignan puntos que se encuentran en el segundo y tercer cuadrante respecto al barco, éste se mueve rumbo al cuarto o al primer cuadrante, respectivamente, al no poder distinguir el signo de la función dentro del arco tangente. Es aquí donde se plantean distintos casos a los que el barco tiene que ser capaz de responder de forma efectiva, dependiendo del cuadrante en el que se encuentre el *Waypoint* respecto a la ubicación de la embarcación en ese momento:

- Caso 1: *Waypoint* en el 1^{er} cuadrante. $x_{cdg} < x_w$; $e_x = x_w - x_{cdg} > 0$
 $y_{cdg} < y_w$; $e_y = y_w - y_{cdg} > 0$
- Caso 2: *Waypoint* en el 2^o cuadrante. $x_{cdg} > x_w$; $e_x = x_w - x_{cdg} < 0$
 $y_{cdg} < y_w$; $e_y = y_w - y_{cdg} > 0$
- Caso 3: *Waypoint* en el 3^{er} cuadrante. $x_{cdg} > x_w$; $e_x = x_w - x_{cdg} < 0$
 $y_{cdg} > y_w$; $e_y = y_w - y_{cdg} < 0$
- Caso 4: *Waypoint* en el 4^o cuadrante. $x_{cdg} < x_w$; $e_x = x_w - x_{cdg} > 0$
 $y_{cdg} > y_w$; $e_y = y_w - y_{cdg} < 0$

En la figura 3.8 se muestra de forma más gráfica lo que se ha expuesto en las condiciones anteriores:

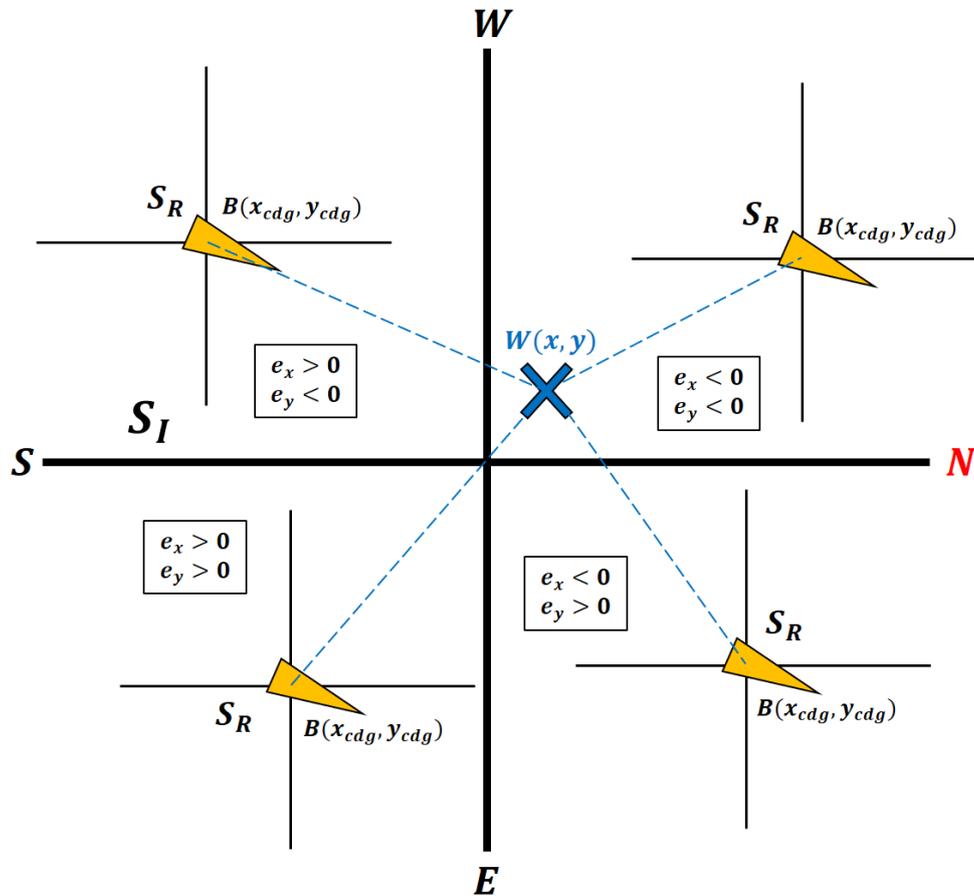


Figura 3.8. Valor del error de posición según la posición del Waypoint, relativa al barco.

Como sabemos que para el primer y cuarto cuadrante el sistema funciona, podemos decir a primera vista que, cuando el valor de $x - x_{cdg}$ es positivo, no hay que hacer ninguna modificación ni añadir ninguna condición más. En caso contrario, cuando $x - x_{cdg}$ toma valores negativos, según el signo de la función $\text{atan}(u)$ podemos saber si el punto destino se encuentra en el segundo o tercer cuadrante respecto la posición instantánea del barco.

Como se ha mencionado antes, una de las condiciones que hemos considerado es que el valor de los ángulos siempre tiene que estar entre 0 y 2π , ya que existe la posibilidad de que en algún momento de su recorrido el barco haya dado más de una vuelta respecto a su c.d.g., tanto en un sentido como en otro, por lo que al restar los dos ángulos, a pesar de que matemáticamente la diferencia entre ellos pueda ser interpretada como correcta, el objetivo es que ambos ángulos, rumbo y orientación, tiendan a igualarse, proporcionando un error de orientación que tiende a cero y así seguir el camino más recto posible.

Una condición bastante simple que podría funcionar en estos casos es la de que si el ángulo se vuelve menor que 0 le sumamos 2π , y por otro lado, si en algún momento observamos que el ángulo supera el valor 2π , entonces se le resta 2π para que vuelva a ser un ángulo comprendido entre los 0 y 360° deseados. Puede que esta condición genere problemas cuando el ángulo se aproxime a valores cercanos a estos límites, ya que ambos ángulos son el mismo y

podría darse el caso en el que se esté sumando y restando constantemente 2π , pudiendo causar problemas a la hora de interpretar los datos el sistema de control. En principio se asume que la respuesta de este sistema va a ser correcta, ya que si el planteamiento es bueno estas discontinuidades no deberían afectar al resultado.

El resultado del giro viene de aumentar y disminuir la potencia en los motores, creando así una diferencia de propulsión, relacionada directamente con el valor del error de orientación. Lo que en realidad queremos evaluar es la diferencia entre el ángulo al que tiene que moverse el barco para ir en línea recta hasta el destino y el ángulo de orientación del propio barco, tomando como referencia el eje X en coordenadas cartesianas, que hemos vinculado al polo Norte geográfico. Cuando esta diferencia tiende a cero significa que el barco está realizando el recorrido de la manera más recta posible, siguiendo la línea imaginaria que une el punto de destino con su posición instantánea. También es importante decir que este valor estará entre -2π y 2π , y de su evaluación dependerá el sentido del giro del barco:

$$\text{Rumbo: } \xi \in [0, 2\pi] \equiv [0^\circ, 360^\circ]$$

$$\text{Orientación: } \theta \in [0, 2\pi] \equiv [0^\circ, 360^\circ]$$

$$\text{Error de orientación: } e_\theta = \xi - \theta \in [-2\pi, 2\pi] \equiv [-360^\circ, 360^\circ]$$

Si todo lo anterior se tradujera a su aplicación en la realidad, estaremos hablando de un controlador en el que se ha implementado el código y es capaz regular la potencia enviada a los motores según la información que recibe, tanto de la estación base como de la electrónica encargada del posicionamiento en el propio barco.

Después de todas estas explicaciones, cabe aclarar que estas condiciones son requeridas por MATLAB por los problemas antes mencionados a la hora de interpretar funciones trigonométricas. Es posible que este valor de orientación sea proporcionado correctamente por alguno de los sistemas de localización como el GPS, el compás o el sistema inercial. En ese caso, probablemente habría que hacer menos modificaciones en la implementación del código al proyecto VNAS.

- **Lazo de control de la velocidad**

Por ahora no se ha encontrado una solución eficiente respecto al control de la velocidad de la embarcación. Durante el diseño del sistema de control en Simulink se han valorado algunas posibilidades, pero ninguna llega a compensar las variaciones de la velocidad producidas por las perturbaciones a las que es sometido el barco. Las opciones que se han considerado son:

- Un sistema en lazo abierto, lo que ocasiona problemas a la hora de obtener la salida deseada ante perturbaciones significativas.
- Un sistema en lazo cerrado, que mejora la respuesta del sistema anterior, pero presenta problemas de estabilidad cuando se alcanza el *Waypoint*.

Estos problemas se presentarán junto a las simulaciones más adelante, para visualizar sus respuestas y poder compararlas detalladamente.

3.2. Elección de modo y control de la velocidad

Dependiendo del uso que le estemos dando al sistema de control se va a requerir una determinada configuración de las variables u otra según el caso, pudiendo tratarse como entradas en uno y como salidas en otro. Las señales con las que se va a trabajar son las siguientes:

- Posición y orientación: las señales referidas a la posición y la orientación van a ser la posición y rumbo instantáneos, información que proporcionaría el GPS y el Compás Electrónico de un barco, y el punto objetivo o *Waypoint*, que sería un dato demandado por el sistema de control, enviado desde la estación base.
- Potencia de los motores: las señales que se envían a los motores podrían provenir tanto de la estación base como del sistema de control, que recibiría la señal también desde tierra de ir a un punto y regularía la impulsión de los motores.
- Velocidad de crucero: se trata de una señal que sería enviada desde la estación base, y que solo sería requerida en el caso de navegación autónoma, reflejándose en la velocidad de avance del barco.

Se podría decir que algunos de estos datos van a ser requeridos de forma conjunta, por lo que pueden agruparse como conjuntos de entradas y/o salidas según el modo de trabajo en el que se desee realizar la tarea. Los “bloques de datos” que se van a requerir son los siguientes:

Posición objetivo (Waypoint) y velocidad de crucero $\rightarrow (x_w, y_w, v)$

Potencia de los motores $\rightarrow V_e, V_b \propto F_e, F_b$

Posición, orientación y velocidad instantáneas (GPS, Compás, ...) $\rightarrow (x_R, y_R, \theta_R, v_R)$

La siguiente figura 3.9 representa a modo general cómo y de dónde se obtendrían las señales utilizadas para el direccionamiento del barco sin entrar en detalle, ya que en siguientes apartados se profundizará bastante más en cada una de las partes del sistema de control:

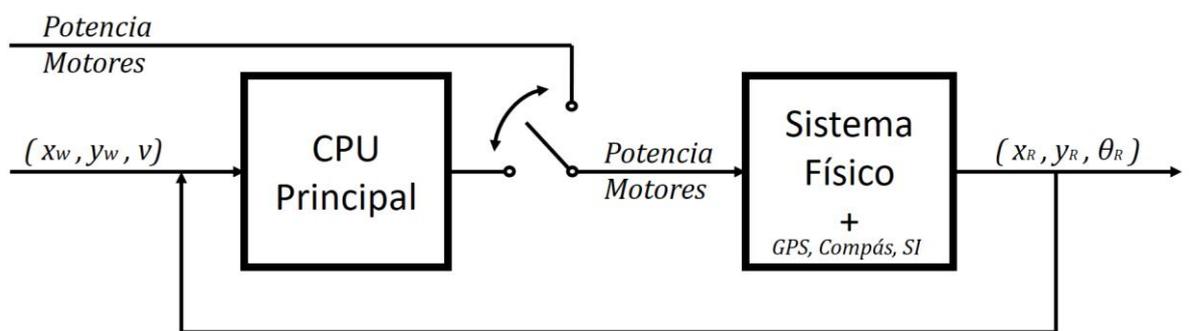


Figura 3.9. Lazo de control del barco simplificado.

Como se puede observar, se ha representado un *switch* que, aunque no existiría físicamente, es una sencilla forma de visualizar como actuaría el sistema de control en cada uno de los modos de funcionamiento. La implementación de este selector de modo iría incluida en el código de control de la estación base, que será la que dará la señal al barco de en qué modo de funcionamiento se encuentra.

También hay que decir que dependiendo del modo de funcionamiento van a ser unos u otros los datos que se requieran para el funcionamiento de la embarcación. A continuación, se explica en qué consiste cada uno de estos modos.

- **Modo de navegación manual**

En el modo de control manual el sistema de control obedece a las señales que se envían directamente desde la estación base al control de los motores embarcado. Para el modo manual puede considerarse un sistema en lazo abierto, ya que en el caso de que cualquier perturbación merme el avance del barco, se podría corregir manualmente en el momento. Cuando se pilota un barco, la orden que se le da es de potencia de motores, no de velocidad. Si se quiere alcanzar una velocidad determinada se hace mediante la variación de la potencia en los motores hasta que se observa que la velocidad es la deseada, por lo que ya se están teniendo en cuenta (y han sido compensadas) las perturbaciones a las que está siendo sometido el barco.

Por ahora vamos a suponer condiciones casi-ideales en las que las perturbaciones son muy débiles y las desviaciones producidas son asumibles para valores normales de funcionamiento de los motores. Como se representa en la figura 3.10 quedaría a modo de esquema el sistema de control:

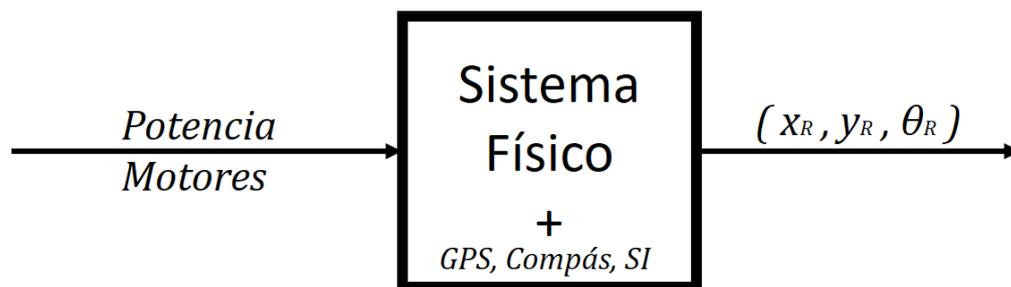


Figura 3.10. Lazo de control del barco en “Modo Manual” simplificado.

Y estas serían las entradas y salidas al sistema:

- Entradas:

$$\text{Potencia de los motores} \rightarrow V_e, V_b \propto F_e, F_b$$

- Salidas:

$$\text{Posición, orientación y velocidad instantáneas (GPS, Compás, ...)} \rightarrow (x_R, y_R, \theta_R, v_R)$$

Esto quiere decir que la embarcación en modo manual responderá ante una señal de voltaje que se envía directamente a los motores y devolverá como salidas su posición, orientación y velocidad en ese instante. Se podría comparar con el equivalente a cualquier vehículo que es manejado por una persona *in situ* y que a modo de información puede visualizar su posición y su velocidad.

- **Modo de navegación autónomo**

El modo de funcionamiento autónomo es el punto principal del sistema de control. Gracias a este sistema el barco será capaz de seguir un rumbo para alcanzar el punto de destino, y lo hará de la forma más eficaz posible.

En este caso el sistema de control si consistirá en un lazo cerrado, ya que gracias a obtener la posición del barco de forma continua será capaz de calcular qué distancia queda para alcanzar el *Waypoint*. A modo de esquema el sistema de control quedaría como se muestra en la figura 3.11:

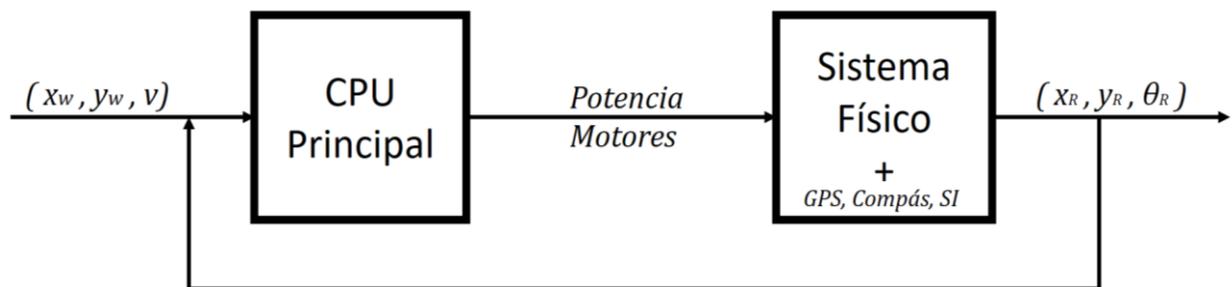


Figura 3.11. Lazo de control del barco en “Modo Autónomo” simplificado.

Con sus respectivas entradas y salidas el sistema:

- Entradas:

$(x_w, y_w, v) \rightarrow$ Posición objetivo (*Waypoint*) y velocidad de cruceo

- Salidas:

$(x_R, y_R, \theta_R, v_R) \rightarrow$ Posición, orientación y velocidad instantáneas (*GPS, Compás, ...*)

El equivalente en un sistema real sería un vehículo que es manejado por un piloto automático, al que se le ha dado una posición de destino y una velocidad de consigna, y a partir de conocer su propia posición y orientación en el plano es capaz de llegar al punto deseado siguiendo un rumbo.

Como se puede observar, la velocidad de navegación en este modo es requerida como una señal de entrada. Dependiendo de si se realimenta esta señal con el valor real de la velocidad (y si además el planteamiento es correcto) o no, podrán compensarse los efectos del viento en el movimiento del barco.

Hasta ahora no se ha conseguido una solución eficaz para este modelo. Aun así, es interesante estudiar y comparar las respuestas de los sistemas propuestos, para analizar las posibles deficiencias de las soluciones propuestas y fijar un punto de partida para la mejora de las respuestas del sistema.

3.3. Consideraciones sobre el modelo de oleaje y viento

Los fenómenos que pueden afectar más significativamente al desempeño del barco van a ser el viento y el oleaje, por lo que será importante hacer una serie de consideraciones para que su contribución se vea reflejada en el sistema.

Suponiendo que en un principio se va a trabajar en aguas relativamente calmadas, los efectos de perturbaciones externas debidas a estos fenómenos de la naturaleza apenas afectarán a los resultados, como se podrá observar en la parte de simulaciones. Es posible que en un modelo más realista hubiera que considerar también el efecto de las corrientes o incluso realizar un estudio más detallado de todos estos fenómenos, pero por ahora se va a considerar la fuerza del viento y del oleaje de forma unificada, de valor uniforme y ambas en la misma dirección. Como detalle, en la siguiente tabla (figura 3.12) se muestra la Escala Internacional para clasificar el estado del mar¹³ para las situaciones que más probablemente nos podríamos encontrar:

Grado	Denominación	Estado correspondiente al viento en nudos	Indicaciones aproximadas para poderlo clasificar	Altitud de olas en metros
0	Calma	0	Mar perfectamente llana	Sin olas
1	Rizada	1-3	Se empiezan a formar pequeñas olas que no llegan a romper	0-0,5
2	Marejadilla	4-10	Se empieza a pronunciar el oleaje que apenas rompe, molestando poco a las embarcaciones menores sin cubierta.	0.5-1

Figura 3.12. Primeros grados de la Escala Internacional del estado del mar (Douglas).

En el Mar Menor y las aguas interiores en las que se pretende trabajar en principio el grado de estado del mar variará de 0 a 2 como máximo en lo que se refiera a la velocidad del viento, pero al ser zonas recogidas al mar abierto la correspondencia con los valores para el oleaje probablemente no sea la correcta.

De igual manera que para calcular la resistencia al avance ejercida por el agua sobre el casco, se puede calcular el empuje que el viento genera sobre la superficie de la obra muerta¹⁴ del casco. Como la velocidad del viento suele tomarse a unos 10 metros de altura, en la superficie del agua, por el efecto de la capa límite de la tierra, la velocidad será algo menor. Según tablas [13], si a 10 metros de altura la velocidad del viento podrá llegar hasta los 10 nudos, donde nos encontramos en la superficie del agua será de unos 7 nudos (unos 3,6 m/s). En la figura 3.13 se muestran los valores de la capa límite terrestre para las condiciones mencionadas:

¹³ En los anexos se adjunta la tabla completa de la Escala Internacional del estado del mar.

¹⁴ Obra viva: parte del casco que está sumergida en el agua.
Obra muerta: parte del casco que no está en contacto con el agua.

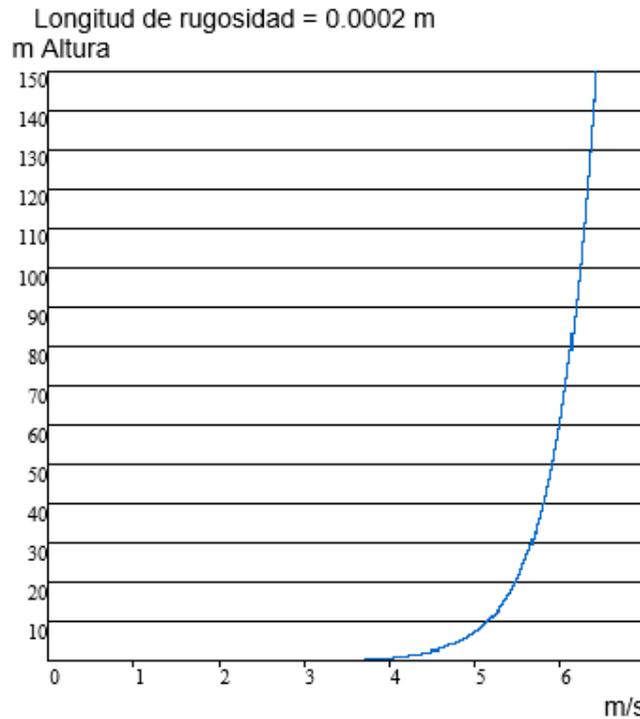


Figura 3.13. Capa límite terrestre en la superficie de un mar en calma [13].

Si se toma como valor máximo el empuje de un viento completamente perpendicular al avance del barco, el empuje máximo que este podrá llegar a ejercer sobre el casco sería:

$$D_{Wind} = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 A = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 3,6^2 \cdot (6,5 \cdot (0,5 - 0,05)) \approx 46 \text{ N} \quad (3.62)$$

Las olas son únicamente ondulaciones del mar, y a no ser que se esté trabajando en aguas poco profundas, no producirían un arrastre significativo del barco, ya que el efecto de la viscosidad es bastante pequeño en comparación al del viento. Lo que harán en mayor proporción será que el barco suba y baje con sus crestas y valles, con un arrastre muy pequeño en comparación con el producido por el viento. Por estos motivos supondremos que el valor máximo de empuje que provocan todas las perturbaciones será de unos 50 N.

A pesar de que no conozcamos una relación precisa entre la velocidad del viento y la de las olas [14], sí que se observa una fuerte dependencia de la orientación de las olas con la dirección en la que sopla el viento. Por este motivo, para añadir estas perturbaciones al sistema de control se van a unificar como una fuerza con una dirección y un módulo, dominado mayormente por el viento.

$$D_W = D_{Wind} + D_{Waves} \approx 50 \text{ N} \quad (3.7)$$

En la siguiente imagen (figura 3.14) se puede observar la previsión de las condiciones meteorológicas y del mar en el Mar Menor, dándonos cuenta de que las direcciones del viento y de las olas son prácticamente idénticas:

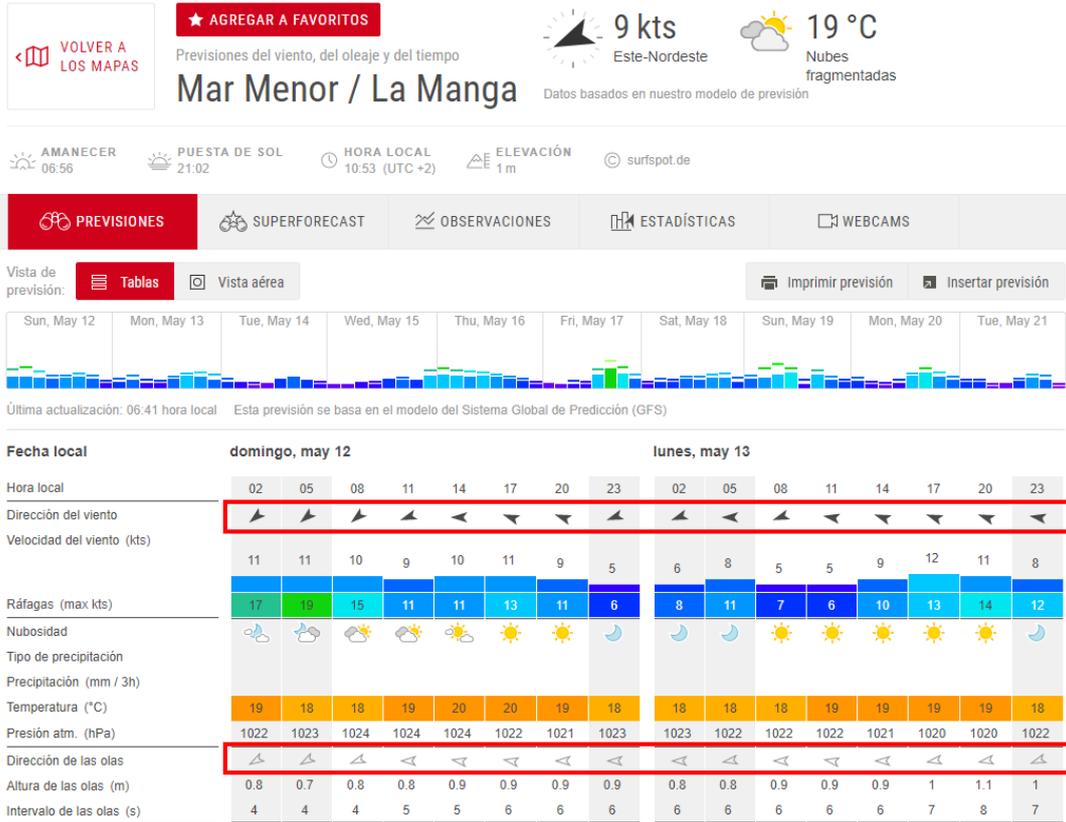


Figura 3.14. Condiciones meteorológicas en el Mar Menor. Comparación entre viento y oleaje [15].

4. Visión global del sistema de control: funcionamiento y respuestas

Con todas consideraciones y condiciones anteriores se puede dar paso a una visión global del sistema, en la que todas estas partes se relacionan para que el sistema de control sea lo más robusto posible, y así evitando dar lugar a grandes desviaciones o errores en la ejecución de los recorridos.

4.1. Diseño y respuestas del sistema de control en Simulink

El sistema de control se puede dividir en bloques, que a su vez van a contener otros bloques más pequeños, que hacen que sea más sencilla tanto su implementación como su comprensión. Estos bloques son los siguientes:

- Sistema físico del barco.
- Selección del *Waypoint*.
- Selección de modo.
 - o Modo manual.
 - o Modo autónomo.
- Condiciones iniciales.
- Control del avance y mantención del rumbo al *Waypoint*.
 - o Calculador del rumbo al *Waypoint*.
 - o Selector del giro óptimo.
 - o Detector de llegada al *Waypoint*.
 - o Corrector del ángulo de orientación.
- Mediciones de posición y velocidad.
- Viento y oleaje.

La visión general del sistema de control que nos queda, después de haber tenido en cuenta todos los apartados anteriores, se muestra a continuación en la figura 4.1:

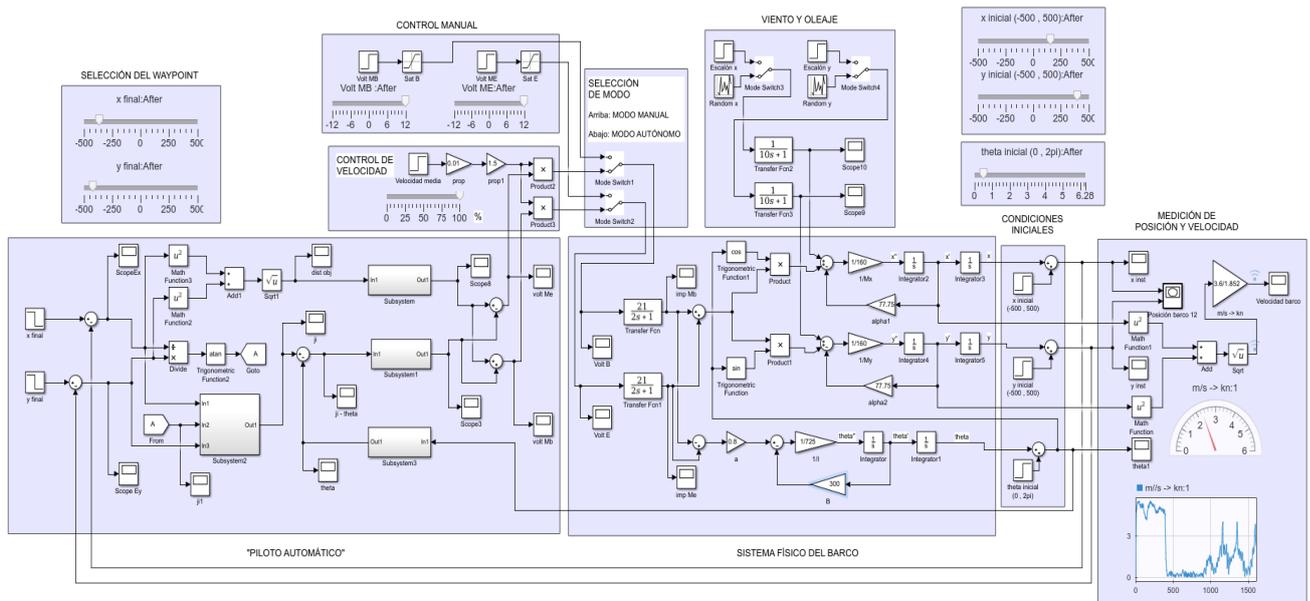


Figura 4.1. Vista general del sistema de control en Simulink¹⁵.

Con todo esto, vamos a pasar a describir más detalladamente cada una de las partes que conforman el sistema de control:

- Sistema físico del barco**

Esta parte ha sido diseñada a partir de las ecuaciones (2. 1), (2. 2) y (2. 3), de la dinámica del barco, teniendo en cuenta perturbaciones exteriores, y considerando la resistencia que ejerce el agua sobre las superficies sumergidas de la embarcación.

Las entradas al sistema se corresponderían con el voltaje que recibe cada motor de las baterías, lo que se traduce en la fuerza de propulsión de los motores. La diferencia entre los valores de estas fuerzas será la que permita que el barco pueda realizar giros más rápidos o más suaves, según se requiera.

Las salidas del sistema son la posición, la orientación y la velocidad instantáneas del barco en el plano. La posición se expresa por sus coordenadas en x e y , y la orientación como un ángulo en radianes que va de 0 a 2π . La velocidad se representa en nudos (kn), y más adelante se mostrará el resultado que tiene en la respuesta del sistema el hecho de realimentarla o simplemente dejar el sistema de la velocidad como un lazo abierto. En la figura 4.2 se puede ver cómo quedaría esta parte en Simulink, que se correspondería con el esquema de la figura 3.1 en el apartado anterior:

¹⁵ En el apartado “9. Anexos” se puede ver esquema a tamaño folio.

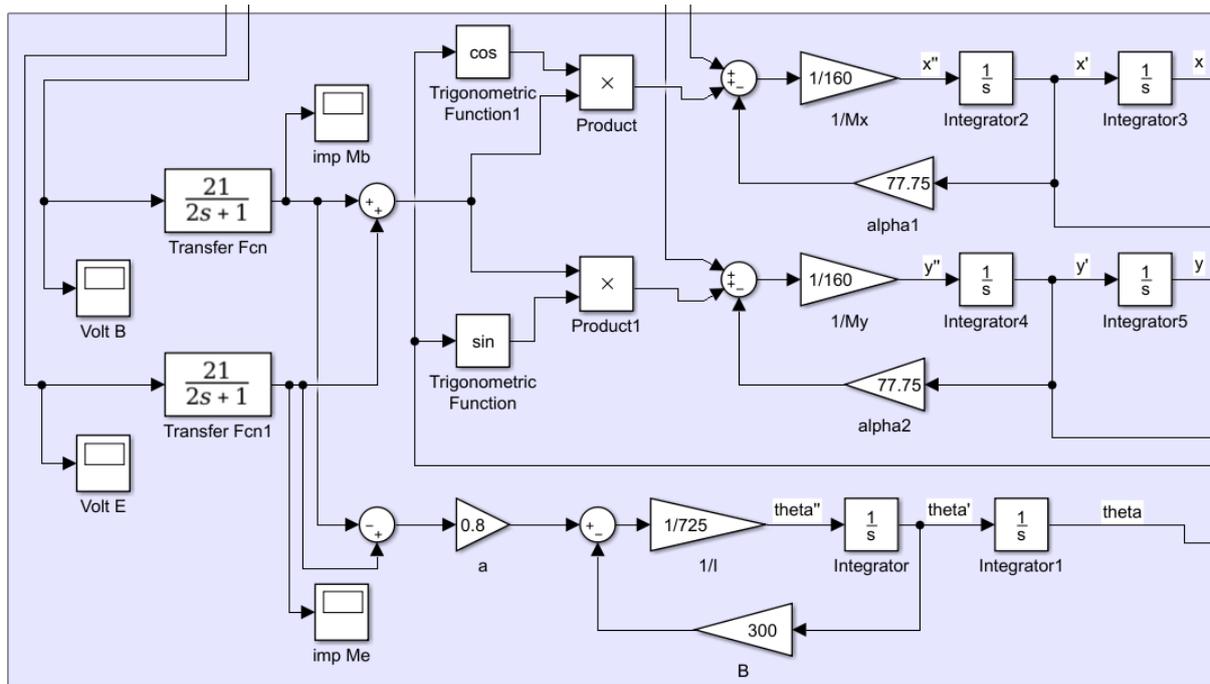


Figura 4.2. Sistema físico del barco en Simulink.

Éste podría considerarse el sistema básico que permite el manejo, con mayor o menor precisión, de una embarcación genérica, en el que se envían voltajes a los motores para poder dirigir la embarcación simulando las palancas de propulsión, y proporciona una posición y orientación realista de la misma, como haría el propio GPS embarcado.

- **Selección del Waypoint**

La selección del punto de destino únicamente consiste en fijar la posición final que se quiere alcanzar, y el sistema de control es el encargado de realizar el recorrido de la manera más eficiente posible. La figura 4.3 muestra su apariencia en Simulink:

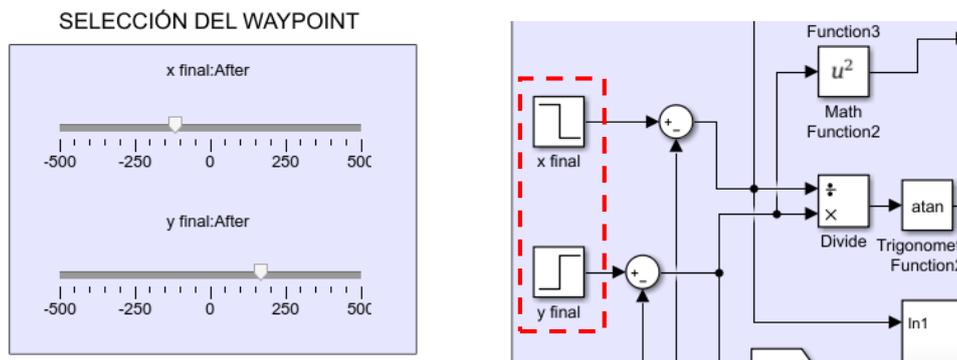


Figura 4.3. Selección del Waypoint en Simulink.

Este valor de consigna se compara constantemente con la posición instantánea proporcionando el valor del error de posición (mencionado durante todo el proceso de diseño), pudiendo conocer en todo momento a que distancia se encuentra el catamarán del objetivo.

- **Selección de modo**

El selector de modo da la posibilidad de elegir si se quiere controlar el barco desde unos controles o si por el contrario se prefiere un punto de destino y el recorrido se hace de forma autónoma. Por lo tanto, se puede hablar de dos modos de funcionamiento: manual y autónomo. Su disposición se puede ver en la figura 4.4, y en forma de esquema en la figura 3.9:

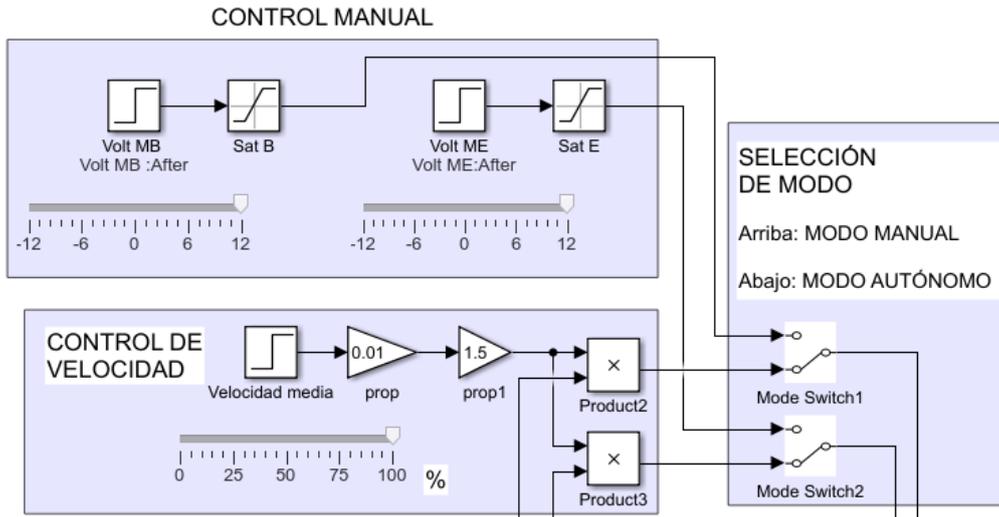


Figura 4.4. Selector de modo en Simulink.

A pesar de que se han contemplado tanto la opción de lazo abierto como de lazo cerrado para el control de la velocidad, en la imagen solo se muestra el sistema en lazo abierto. En los apartados siguientes se desarrollarán y explicarán cada una de las soluciones estudiadas.

- Modo Manual:

Este modo es el que permite que la embarcación sea dirigida desde unos mandos de control en la estación base, pudiendo el piloto maniobrar a su antojo, dando mayor o menor propulsión a los motores por separado. En la figura 4.5 se muestran estos controles:

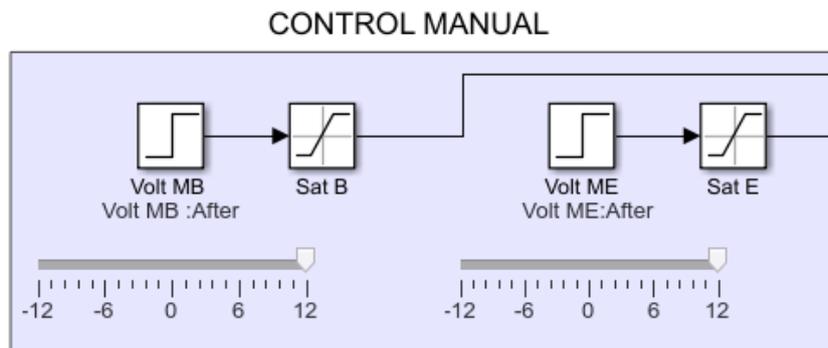


Figura 4.5. Propulsión en “Modo Manual” en Simulink.

Se ha añadido un saturador al esquema de control para que los voltajes no sobrepasen los 4.8 V que se estimaron en apartados anteriores para dar una fuerza de propulsión de 200 N, que son combinación de generar 100 N en cada motor. Por lo que a máxima potencia la velocidad del barco deberá estar en torno a los 5 nudos, como se puede ver en la figura 4.6:

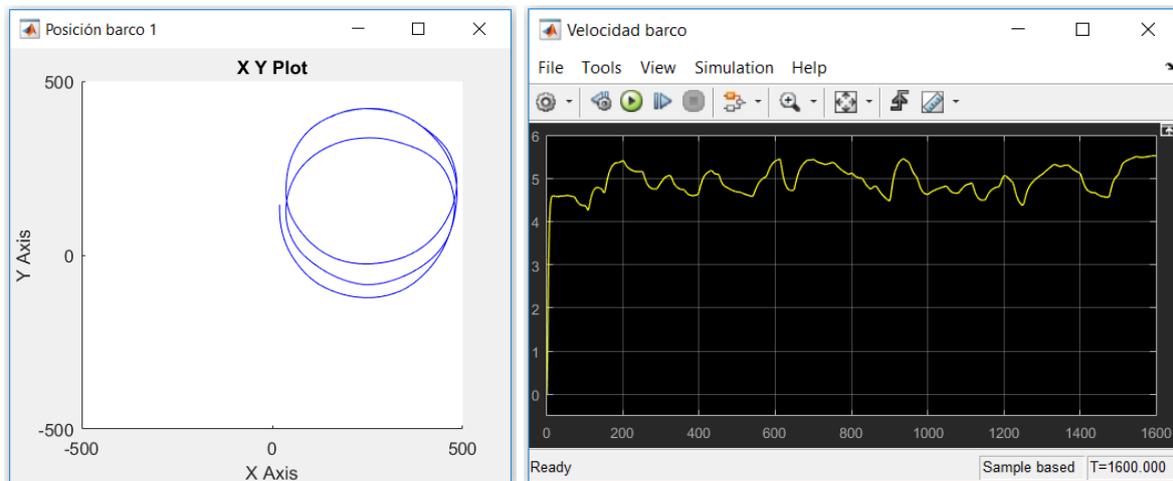


Figura 4.6. Respuesta del barco en “Modo Manual”.

- Modo Autónomo:

Este modo será el que permita al barco alcanzar un punto de destino desde una posición inicial cualquiera con un margen de error relativamente pequeño, únicamente ordenando las coordenadas del *Waypoint* al que se quiere ir e introduciendo una velocidad de consigna. En la figura 4.7 se representa el control de velocidad en modo autónomo:

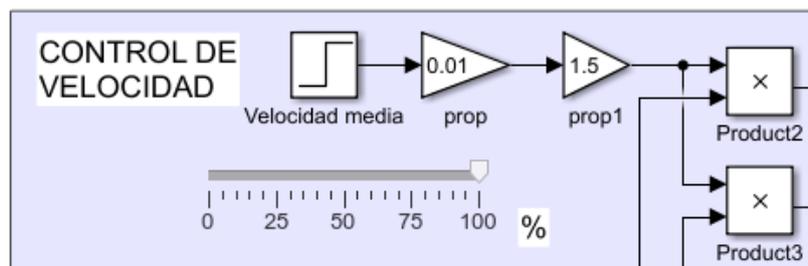


Figura 4.7. Propulsión en “Modo Autónomo” en Simulink (lazo abierto).

Aunque no se expone en este punto, se han estudiado dos métodos de controlar la velocidad del barco en “Modo Autónomo”, en lazo abierto y en lazo cerrado, con algunas variaciones en las respuestas, y a su vez hemos querido diferenciar entre estos métodos la utilización de dos variables distintas: el control de la velocidad mediante el error de posición y el control de la velocidad mediante la comparación del valor real con el de consigna. Tendremos entonces cuatro formas distintas de controlar la velocidad. Veremos que en principio las respuestas son bastante similares, pero si se analizan detenidamente se puede observar zonas de incertidumbre, sobre todo las cercanas al *Waypoint*.

Es importante fijarse en el voltaje que les llega a los motores en modo autónomo, pues es lo que va a hacer que el barco se mueva a la velocidad que se desea. En la siguiente imagen (figura 4.8) se puede ver la señal de voltaje en cada uno:



Figura 4.8. Variación de voltaje en los motores en modo autónomo.

Podemos identificar 3 zonas diferenciadas en las gráficas del voltaje de los motores. En la primera, de 0 a 400 segundos, los valores medios oscilan alrededor de 4,8 V, que es el valor para el que se ha calculado que se alcanzarán los 5 nudos prefijados. Esta zona se corresponde con el recorrido que hace el barco hasta alcanzar su destino. La segunda zona, de 400 a 900 segundos, representa como responde el barco durante todo el tiempo que permanece en el *Waypoint*, y se observa que el valor medio del voltaje baja hasta hacerse cercano a cero, intentando mantener la posición. Y la última, a partir de los 900 segundos, es una zona de inestabilidad provocada por la comparación de los ángulos, en la que el barco empieza a girar alrededor del objetivo sin llegar a compensar el error de orientación e_{θ} .

- **Condiciones iniciales**

Lo que se pretende conseguir estableciendo unas condiciones iniciales de localización y de orientación en el plano es que, sea cual sea este punto, siempre alcance el *Waypoint*. Estas condiciones iniciales que en Simulink son valores modificables por el usuario vendrían a representar la posición dada por el GPS en el instante en el que se da la orden de alcanzar un punto de destino. La figura 4.9 representa como quedaría en Simulink:

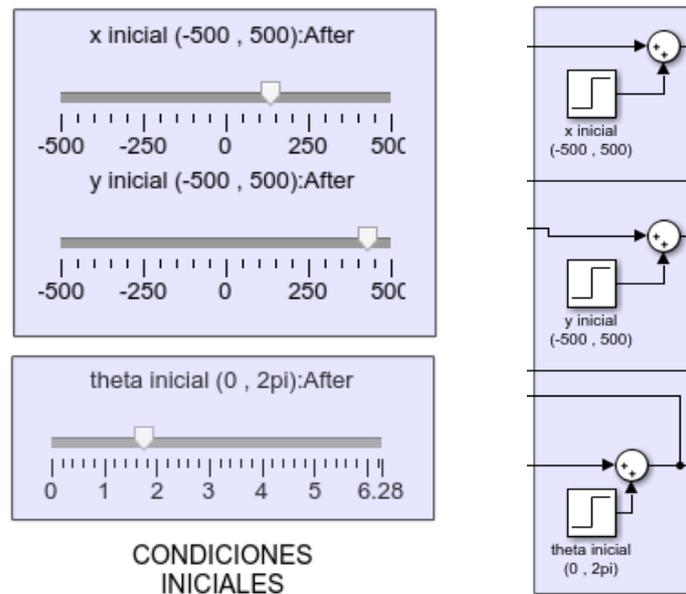


Figura 4.9. Selección de condiciones iniciales en Simulink.

- **Control del avance y mantención del rumbo al Waypoint**

Esta parte puede que sea la más compleja del sistema de control, ya que incorpora bloques condicionales, a veces entre más de dos opciones, pero aun así su estructura es muy sencilla y dentro de ella no hay elementos difíciles de entender. Para una mejor comprensión puede dividirse en subsistemas más pequeños y explicarse su funcionamiento por separado, aunque trabajen simultáneamente:

- Calculador del rumbo al Waypoint:

Lo primero que hace este bloque es evaluar el valor de $\text{atan}(\xi)$, que por las condiciones establecidas al principio se pretende que sea siempre mayor o igual que cero. El valor que se obtendrá de Simulink estará entre $-\pi/2$ y $\pi/2$, por lo que a los valores negativos les sumará una vuelta para hacerlos positivos y que sigan siendo el mismo ángulo. Esta secuencia solo proporciona ángulos en el 1^{er} o 4^o cuadrante, por lo que hay que comprobar si en realidad pertenecen al 3^{er} o 2^o cuadrante, respectivamente.

Lo siguiente que se hace es evaluar tanto el signo del error e_x como el del error e_y , para saber hacia que cuadrante debe moverse el barco respecto su posición. Si el error en x es positivo significa que el barco está en el 1^{er} o 4^o cuadrante, que son los que la secuencia anterior detecta como posibles desde el principio. Si por el contrario este valor es negativo, significa que el barco debe moverse hacia el 3^{er} o 2^o cuadrante, por lo que habrá que evaluar el error e_y para saber cuál de los dos es exactamente. Su esquema se representa en la siguiente figura:

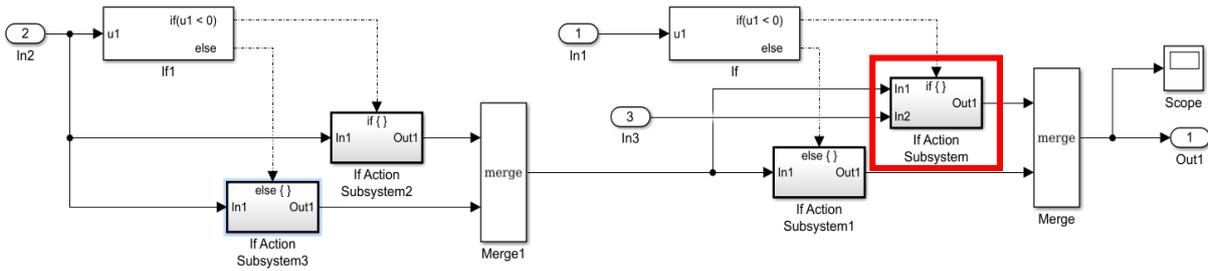


Figura 4.10. Calculador del cuadrante del Waypoint en Simulink. Primera parte.

La siguiente es la última parte de la secuencia (figura 4.11), correspondiente al bloque resaltado en rojo de la figura 4.10, en la que se evalúa el signo del error e_y . Si este valor es negativo se tratará del 3^{er} cuadrante, por lo que habrá que sumarle π al ángulo correspondiente del 1^{er} cuadrante. Si por el contrario este valor es positivo se tratará del segundo cuadrante, y habrá que restarle π al ángulo correspondiente del 4^o cuadrante.

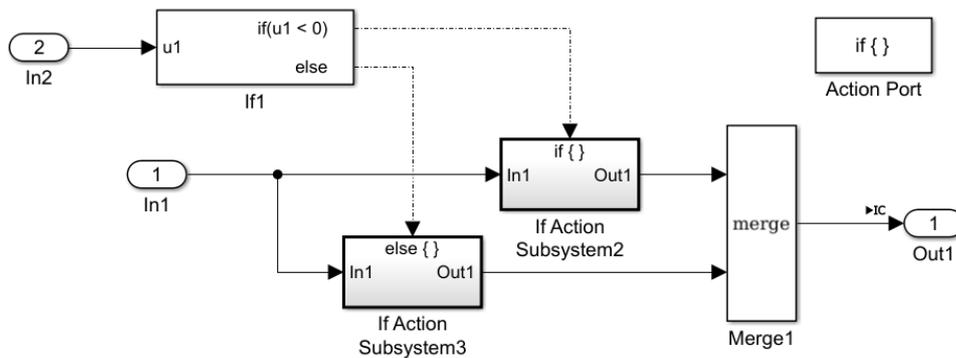


Figura 4.11. Calculador del cuadrante del Waypoint en Simulink. Segunda parte.

De aquí se obtiene el ángulo del rumbo ζ que tiene que seguir el barco en cada instante, para compararlo con su rumbo actual y poder corregir el error de orientación. En la figura 4.12 se representa como varía su valor a lo largo de la simulación:

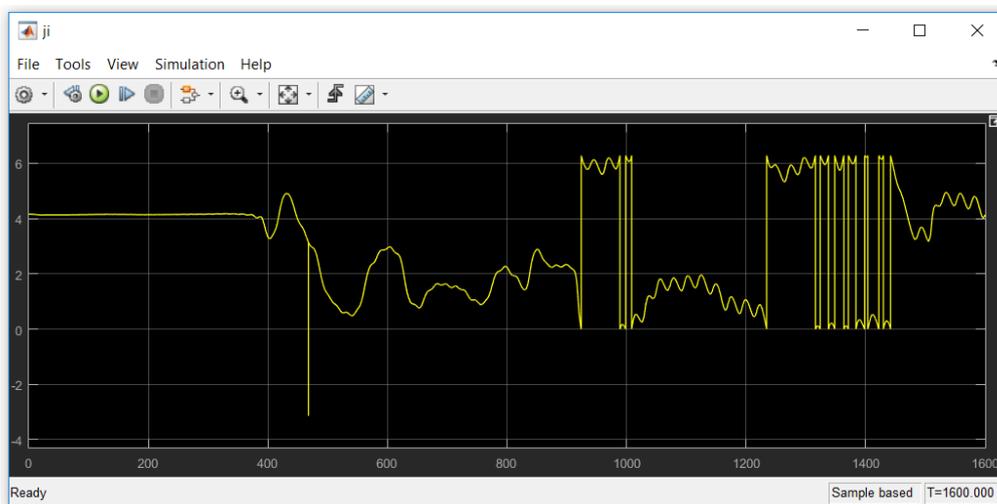


Figura 4.12. Rumbo que sigue el barco en cada instante entre 0 y 2π .

- Selector del giro óptimo:

Esta parte del sistema es la que se encarga de tomar la decisión de en qué sentido es preferible realizar el primer giro para orientarse hacia el destino, o lo que es lo mismo, si la distancia mínima a recorrer hasta el *Waypoint* sería girando en sentido horario o en sentido antihorario. Para ello se evalúa la diferencia entre el ángulo que formaría la línea recta imaginaria que une la posición del barco con el *Waypoint* respecto a la horizontal (eje x o dirección Norte según se interprete) y el que se corresponde con la orientación del barco en ese instante.

Este ángulo, al que se ha llamado error de orientación, puede tomar valores entre -2π y 2π , y dependiendo de este valor el primer giro será hacia un lado o hacia otro. Se ha añadido un bloque saturador para que no se alcancen valores de pico indeseados en la potencia de los motores a la hora de realizar los giros, ya que podrían dañarlos, y también para darle estabilidad al sistema y que el barco mantenga un rumbo lo más cercano posible a una línea recta.

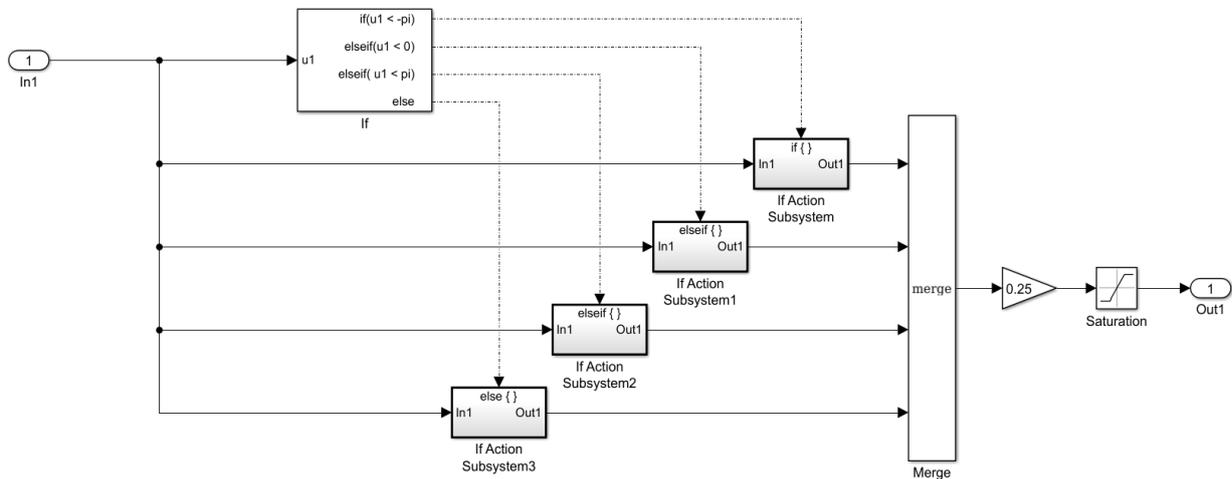


Figura 4.13. Selector del giro óptimo en Simulink.

Del sistema de la imagen anterior (figura 4.13) también se obtiene el “voltaje de corrección” que hace que los motores corrijan el rumbo, ya que se basa en el mismo principio de funcionamiento que la selección del ángulo óptimo. Como se puede observar, esta multiplicado a su salida por un factor de 0,25. Este factor puede regularse según como se quiera que reaccione el barco. Si se aumenta, el catamarán girará más rápido pero también más bruscamente. Si por el contrario se disminuye su valor el catamarán girará más lento, pero de forma suave. La respuesta se puede ver en la siguiente figura 4.14:

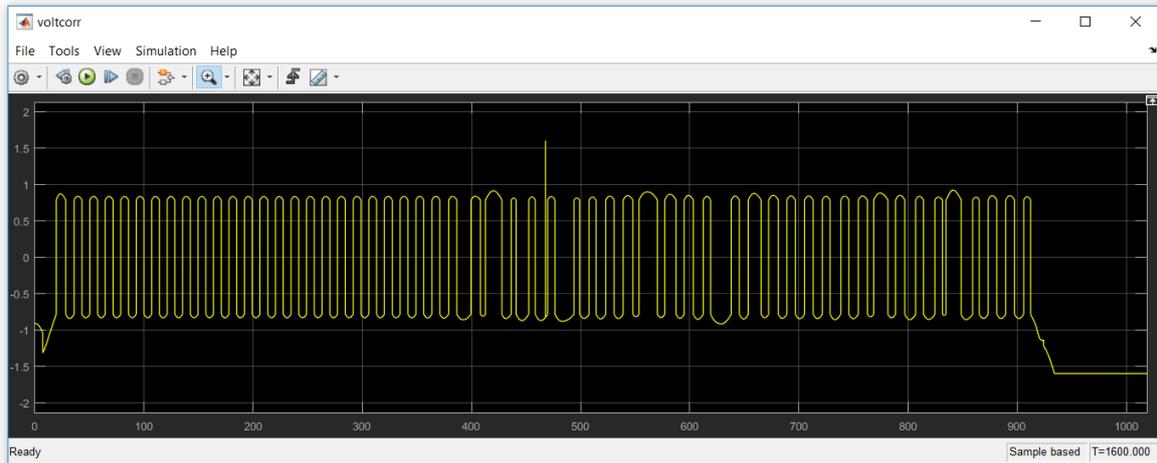


Figura 4.14. Voltaje corrector enviado a los motores, de valor medio cero.

Además, para que el sistema sea capaz de trabajar ante perturbaciones, cuando el error de orientación e_θ se aproxima a cero se ha añadido una condición con un *offset* para que este voltaje de corrección nunca sea nulo, pero sí lo será su valor medio, para que no afecte de forma apreciable a las variaciones de velocidad del barco.

- Detector de llegada al Waypoint:

El sistema detecta que ha llegado al punto de destino cuando el barco se acerca desde cualquier dirección a una distancia menor a 20 metros¹⁶ del *Waypoint*. Como estamos trabajando con distancias del orden de 10^2 a 10^3 metros, vamos a suponer que el margen de trabajo es más que suficiente. Para distancias mayores a la establecida como límite el voltaje nominal en los motores se mantiene constante gracias a unos saturadores. En la figura 4.15 se muestra como varía la distancia a lo largo de la simulación, en especial cuando se alcanza el *Waypoint*:

¹⁶ Esta distancia de llegada al *Waypoint* se ha establecido de manera arbitraria, considerando que se acerca lo suficiente al destino y que también permite un margen de error al sistema de control para que sea capaz de trabajar en estas zonas de ruptura.

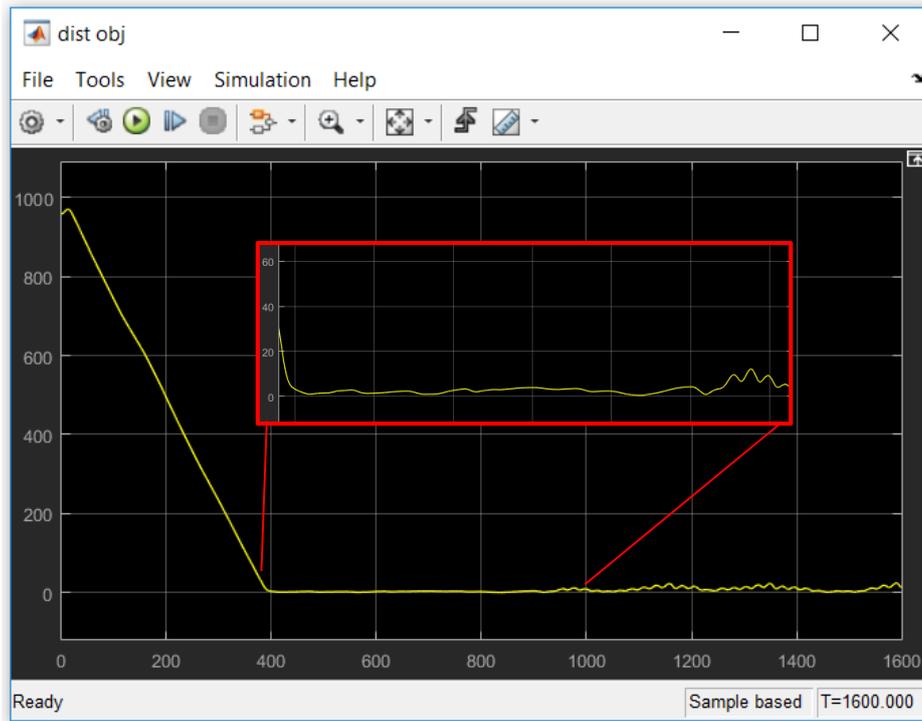


Figura 4.15. Distancia al Waypoint en el tiempo.

Cuando se alcanza esta zona, la potencia en los motores del barco disminuye, a la vez que intentan mantener la posición de destino oscilando alrededor de este punto. Otra solución que podría tomarse es que cuando se alcance el destino los motores del barco se paren, pero esto lo dejaría a merced de las condiciones atmosféricas y del mar. Entonces el barco se alejaría del *Waypoint* y podría sufrir daños al perder su control, por lo que esta opción ha quedado descartada por el momento. El sistema de la figura 4.16 es el encargado de este control:

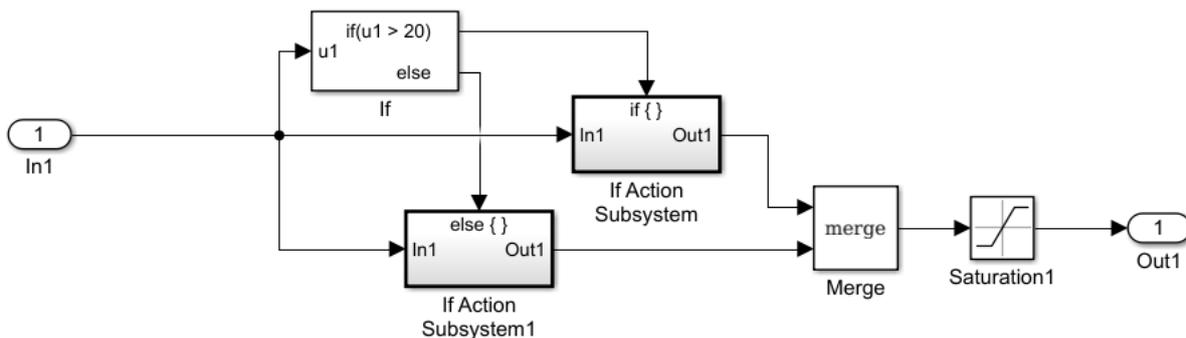


Figura 4.16. Detector de llegada Waypoint en Simulink.

A su vez, se ha añadido un saturador para limitar la potencia de los motores en el rango que se quiere trabajar, de -3,2 V a 3,2 V en corriente continua, mostrado en la figura 4.17. Los otros 1,6 V que faltan hasta alcanzar los 4,8 V de trabajo se obtendrán de la parte del selector de giro óptimo.

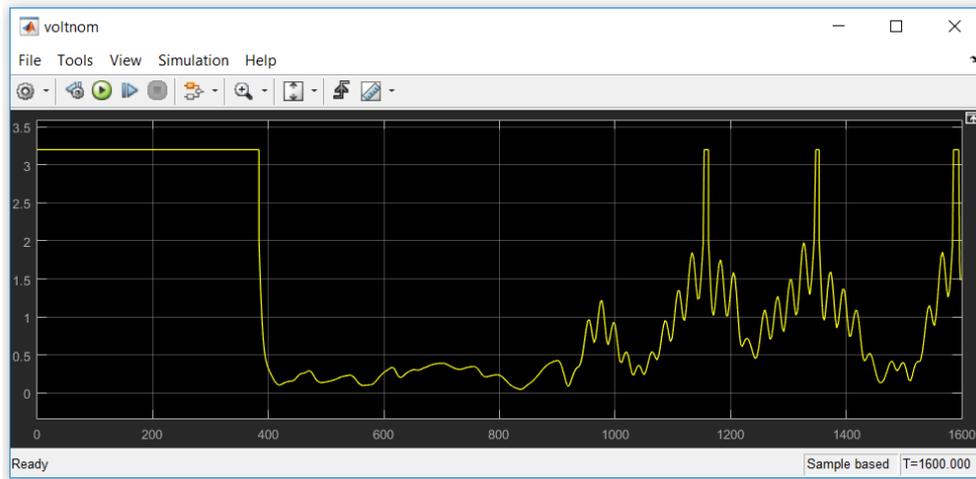


Figura 4.17. Voltaje nominal enviado a los motores.

Al comenzar a diseñar el sistema de control en Simulink pensamos que para llegar a los 4,8 voltios requeridos para alcanzar la velocidad de 5 nudos se debía hacer por combinación de los 3,2 voltios nominales más los 1,6 voltios de corrección, pero al ser esta última señal de valor nulo la velocidad que se alcanzaba era un tercio menor de la deseada. Para solucionar esto sin hacer grandes cambios se ha optado por amplificar en un 50% el voltaje antes de entrar a los motores, esto es multiplicándolo por un factor de 1,5 correspondiéndose así con los 4,8 voltios establecidos en los primeros cálculos de este trabajo.

- Corrector del ángulo de orientación:

Este sistema se encarga de que el valor del ángulo de orientación del barco sea siempre positivo y se mantenga entre 0 y 2π . Probablemente, por medio de los sistemas de navegación actuales se podría obtener el ángulo de orientación en las condiciones deseadas, es decir, que estos sistemas ya integran todas estas consideraciones que estamos planteando, pero en MATLAB es necesario establecerlas manualmente para poder trabajar con valores correctos y acotados.

Básicamente lo que hace este bloque, representado en la figura 4.18, es que cuando el ángulo alcanza valores negativos le suma una vuelta a su valor, y cuando alcanza valores superiores a 2π le resta una vuelta, así manteniéndose siempre en este rango y evitando el problema de que el barco acumule muchas vueltas y tenga que deshacer todos esos giros para estabilizar el error de orientación en torno a cero. Para Simulink no se ha conseguido solucionar este problema definitivamente. Sin embargo, en el código de programación de la GUI de MATLAB no ha habido problemas a la hora de establecer estas condiciones al ángulo de orientación del barco.

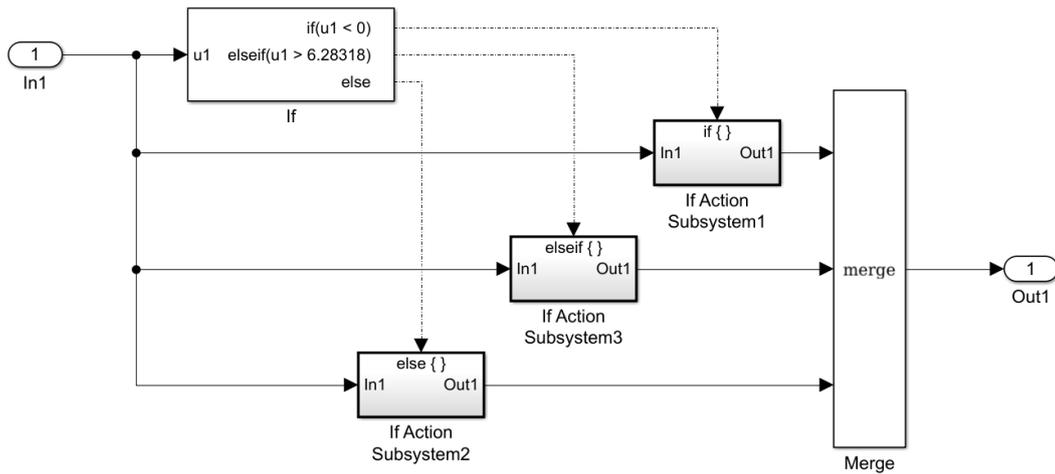


Figura 4.18. Corrector del ángulo de orientación en Simulink.

- **Sistemas propuestos para el control de la velocidad en “Modo Autónomo”**

En el apartado de selección de modo se mencionaba que se habían estudiado cuatro formas distintas de controlar el sistema. Las dos primeras que se va a mostrar son en lazo abierto, es decir, se envía una señal de velocidad y la respuesta del sistema no se tiene en cuenta. Las dos siguientes serán en lazo cerrado, con realimentación de la velocidad del sistema. A su vez, en cada grupo el control del voltaje de los motores se hará usando en uno la distancia al *Waypoint* como señal y condición, y en otro la velocidad de consigna como señal y la distancia al *Waypoint* como condición.

A modo de esquema así se van a presentar las distintas formas de control de la velocidad:

- Lazo Abierto:
 - 1) Señal: distancia al *Waypoint* // Condición: distancia al *Waypoint*.
 - 2) Señal: velocidad de consigna // Condición: distancia al *Waypoint*.
- Lazo Cerrado:
 - 3) Señal: distancia al *Waypoint* // Condición: distancia al *Waypoint*.
 - 4) Señal: velocidad de consigna // Condición: distancia al *Waypoint*.

En las siguientes 4 figuras se va a representar como ejemplo la reacción del sistema cuando se le ordena que alcance el punto *W* (-350,-420) a máxima velocidad (5 kn). Bien hay que decir que donde se visualizan las diferencias más apreciables es en las figuras 4.21 y 4.22, al alcanzar el *Waypoint* y en la curva de la velocidad respectivamente. En la figura 4.19 se puede ver cuál es la diferencia de diseño entre los cuatro sistemas propuestos, y en la figura 4.20 se observa que la forma de llegar al destino no muestra diferencias:

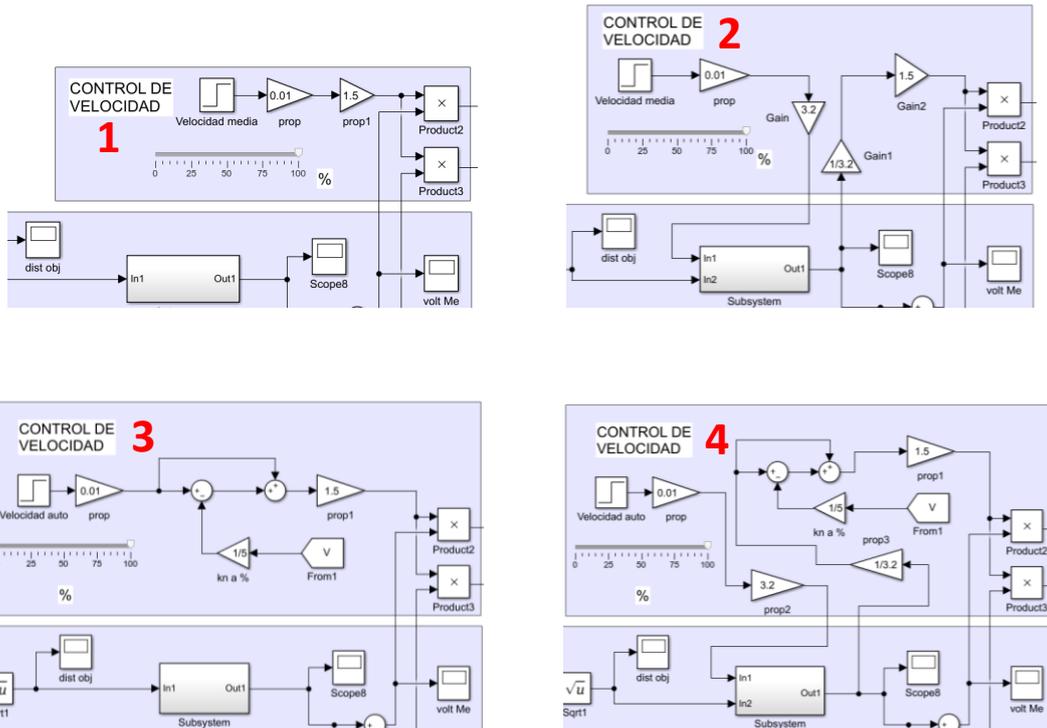


Figura 4.19. Modelos propuestos para controlar la velocidad en Modo Autónomo.

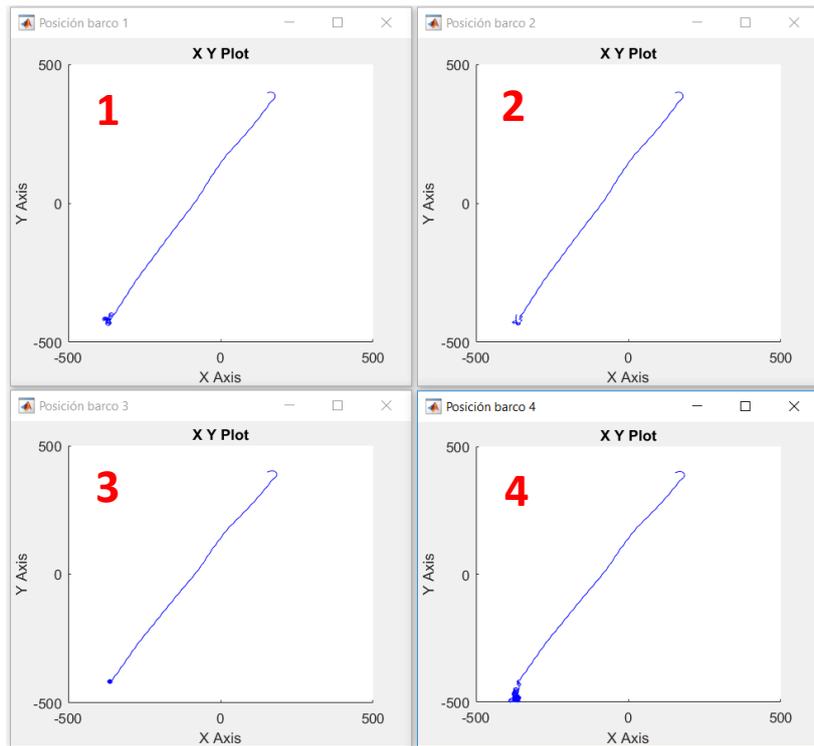


Figura 4.20. Respuesta del barco en cada uno de los modelos propuestos anteriores.

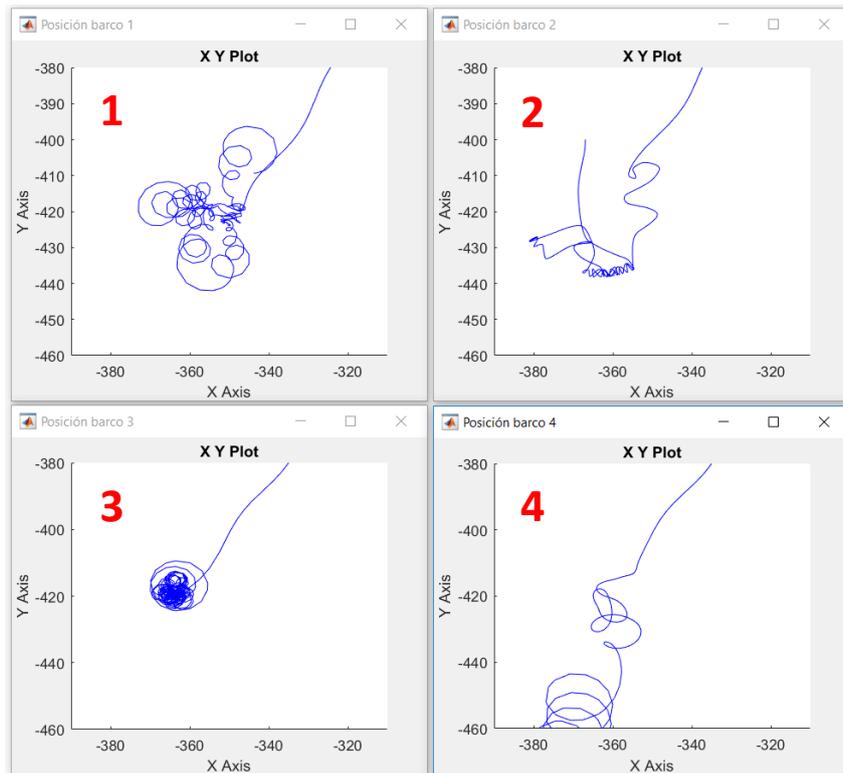


Figura 4.21. Respuesta del barco en el Waypoint para los modelos propuestos anteriores.

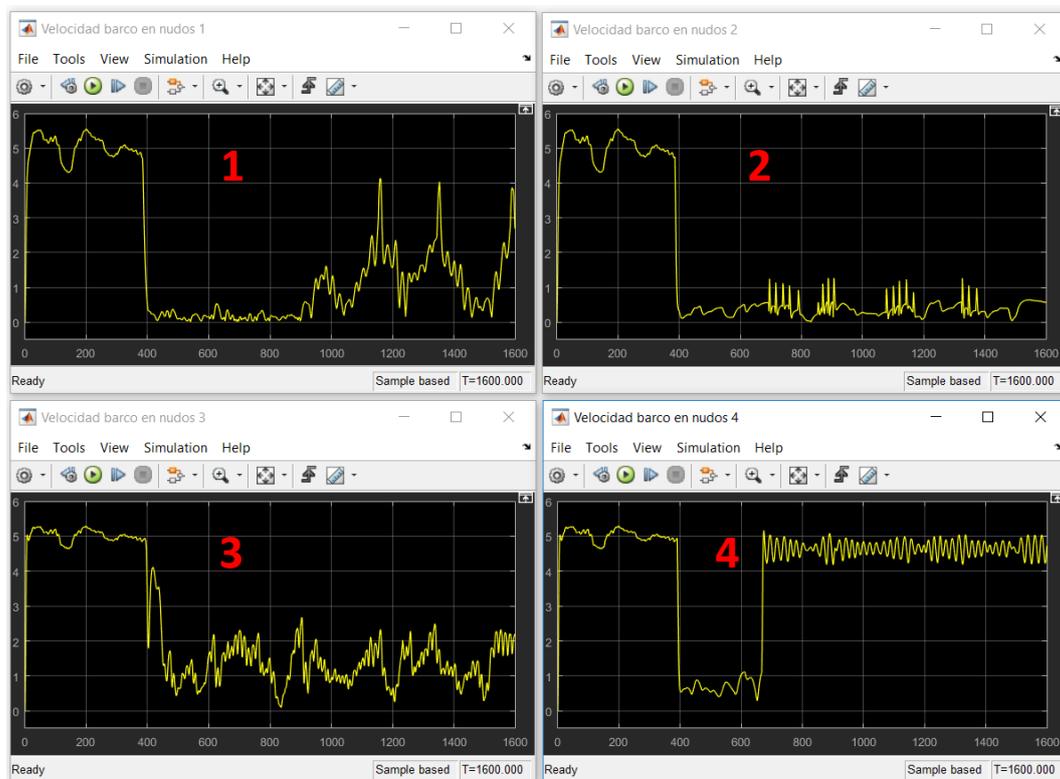


Figura 4.22. Respuesta de la velocidad en cada uno de los modelos propuestos anteriores.

Como podemos ver en la figura 4.22, las respuestas se parecen bastante, aunque unos sistemas responden mejor corrigiendo la velocidad durante el trayecto al *Waypoint*, haciendo que la velocidad sea más estable a pesar de las perturbaciones, y en la figura 4.21 algunos sistemas presentan una respuesta bastante estable cuando el barco alcanza el destino, lo que hace que el barco se quede navegando en torno a él.

- **Mediciones de posición y velocidad**

En este apartado se pretende simular la imagen que se vería en la pantalla de un sistema GPS. Principalmente se muestra mediante una gráfica XY la posición y la trayectoria que seguiría el barco en el plano, el rumbo que ha ido tomando, y también cómo varía su velocidad según va avanzando y el sistema responde a los estímulos que le llegan. En la siguiente imagen (figura 4.23) se muestran los valores más representativos y que más interesan para saber si la respuesta del sistema es correcta y cercana a la realidad:

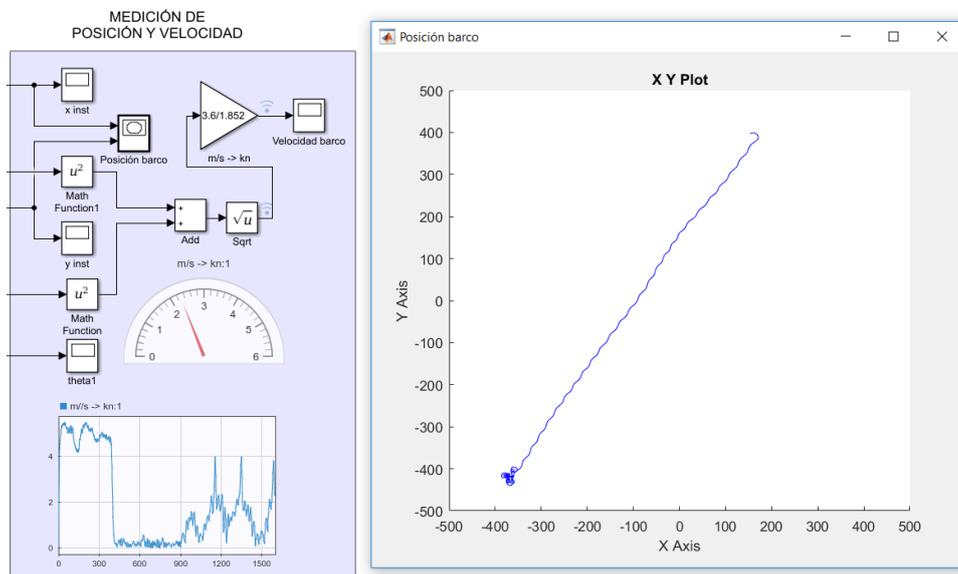


Figura 4.23. Medición de posición y velocidad en Simulink.

También se ha querido mostrar en este apartado la evolución de la velocidad durante todo el recorrido del barco añadiendo una gráfica que la representa a lo largo de toda la simulación. A modo de detalle, si nos fijamos en la siguiente gráfica (figura 4.24) también puede verse claramente la curva de aceleración y desaceleración al inicio y al final del recorrido:

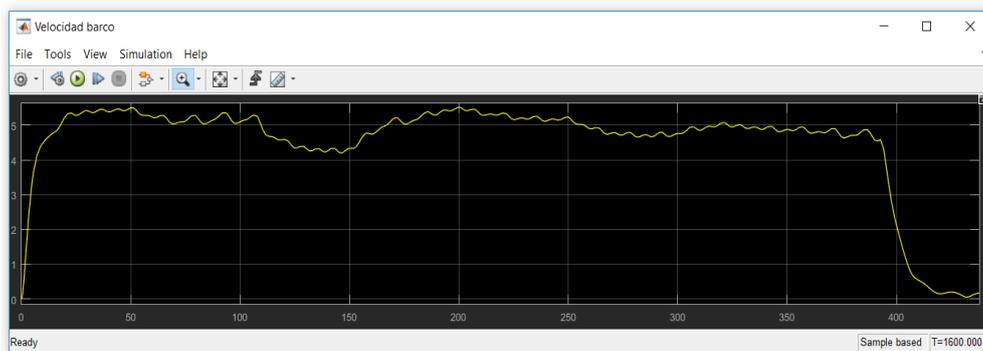


Figura 4.24. Curva de la velocidad desde el origen hasta el *Waypoint* en Simulink.

- **Viento y oleaje**

Para que el diseño sea lo más real posible se le han añadido las perturbaciones debidas al viento, ya que de una manera más o menos significativa afectan al movimiento del barco. La fuerza que puede ejercer el oleaje sobre las superficies sumergidas del barco también puede considerarse incluida en el viento, ya que, como se ha comentado antes, hemos considerado que ambas fuerzas suceden la misma dirección y sentido.

En principio no se ha tenido en cuenta el efecto de corrientes marinas, estelas u otros fenómenos, ya que consideraremos como el principal al viento, por su relativa uniformidad y estacionalidad. Los demás fenómenos son más puntuales y en general no afectarán a los recorridos del barco.

En la simulación se va a plantear elegir entre una perturbación constante, como es un viento estable y uniforme, y una perturbación variable, que va a responder al caso de un barco sometido a un escenario con rachas de viento. En la figura 4.25 se representa como queda este apartado en el diseño de Simulink:

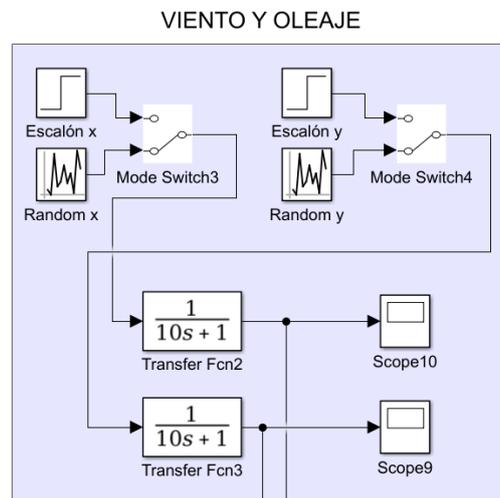


Figura 4.25. Simulación de perturbaciones entrantes al sistema físico en Simulink.

4.2. Aplicación GUI en MATLAB

Una vez tenemos claro el sistema de control que se va a utilizar para controlar el catamarán, el siguiente paso es volcar toda esta información en forma de código en MATLAB. Para darle un aspecto gráfico ordenado, la aplicación se va a programar con la herramienta de creación de UIs, que permite insertar bloques predefinidos identificados en el código mediante funciones, que pueden ser editadas para seleccionar los datos que se utiliza en cada una.

Los datos que enviaría la estación de tierra al barco van a ser [9]:

- Selección de modo de funcionamiento: Manual (M) o Autónomo (A).
- Señales de actuación: valores de las señales de voltaje a los motores (M).
- Control para ir al destino o *Waypoint*: coordenadas del punto (A).
- Parámetros del control de velocidad (A).

La información que enviaría el barco a la estación de tierra para que sean utilizados y comparados con las señales que se han enviado previamente son:

- Posición y orientación actuales. En modo manual solo servirán para hacer el seguimiento de la embarcación, pero en modo autónomo se utilizarán también para alcanzar el *Waypoint* de forma eficiente.
- Velocidad instantánea, tanto si solo se visualiza como si se utiliza para mejorar el control por velocidad en modo autónomo.

Por pantalla se podrán tanto introducir los valores que queremos para las entradas como mostrar los valores de las salidas que queremos controlar. En la siguiente imagen (figura 4.26) se puede ver cómo quedaría la interfaz de usuario en la que se van a visualizar todos los datos de navegación:

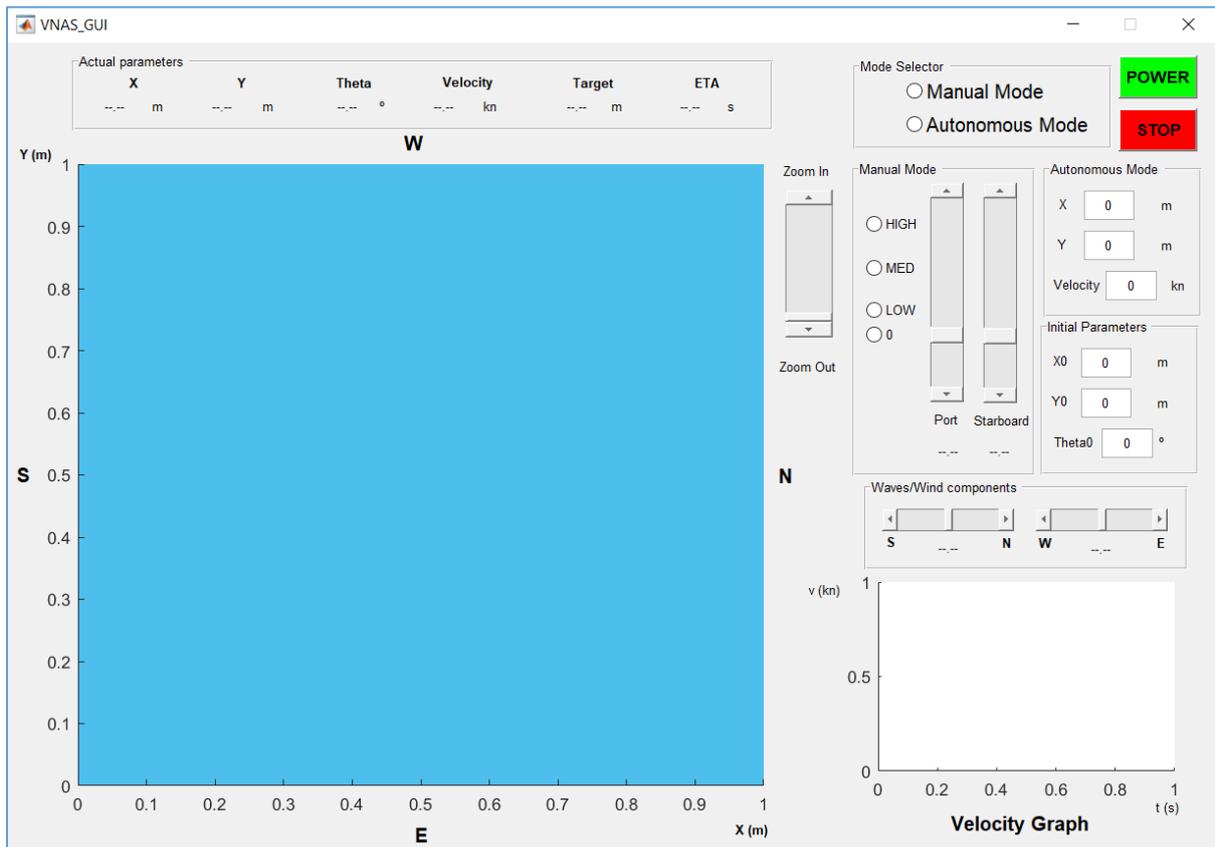
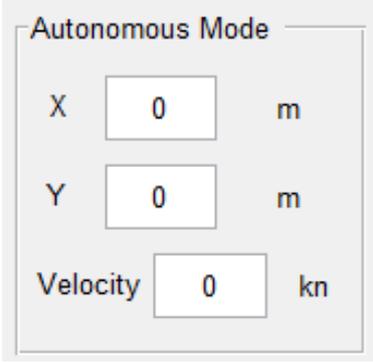


Figura 4.26. Interfaz de usuario GUI en Matlab.

Esta interfaz de usuario ha seguido la misma estructura que el sistema de control diseñado en Simulink. Las partes en las que se puede dividir son equivalentes a las explicadas en el apartado anterior al respecto. La correspondencia es la siguiente:

- **Selección del *Waypoint***

Para seleccionar el punto de destino al que se quiere ir se requiere introducir las coordenadas del mismo (x e y) en metros, y la velocidad de consigna a la que se quiere que vaya al barco en nudos (figura 4.27). Estos datos solo serán requeridos para el funcionamiento en modo autónomo, pero también pueden ser introducidos como apoyo visual en modo manual.



Autonomous Mode

X m

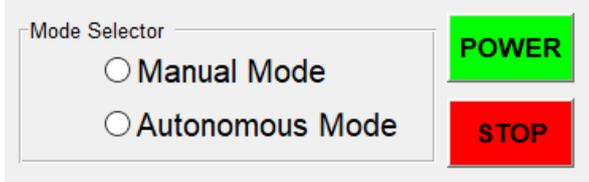
Y m

Velocity kn

Figura 4.27. Panel de selección del Waypoint y velocidad de consigna.

- **Selección de modo**

La selección de modo (figura 4.28) se hace marcando la casilla correspondiente y seguidamente pulsando el botón “POWER”. Para cambiar de modo durante una simulación se procede de igual manera. El botón “STOP” únicamente detiene la simulación.



Mode Selector

Manual Mode

Autonomous Mode

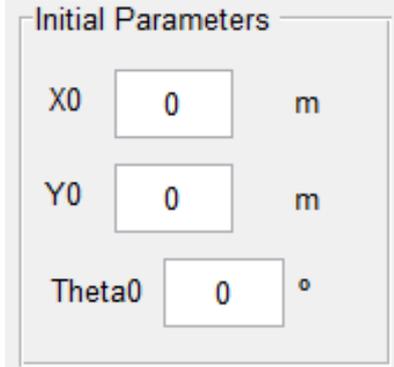
POWER

STOP

Figura 4.28. Panel de selección de modo.

- **Condiciones iniciales**

Las condiciones iniciales son requeridas para comprobar que el sistema de control va a responder correctamente sea cual sea el punto de partida. Los datos que se piden son la posición inicial desde la que comenzará la simulación en metros y el ángulo de orientación inicial del barco en grados (figura 4.29).



Initial Parameters

X0 m

Y0 m

Theta0 °

Figura 4.29. Panel de especificación de condiciones iniciales.

Este panel solo afectará al iniciar la simulación. Cualquier cambio de condiciones durante una simulación tomará como punto inicial el último valor de posición calculado.

- **Posicionamiento y velocidad**

Las variables que se muestran en este panel (figura 4.30) se corresponden con los valores ligados al barco en cada instante. Se mostrará en todo momento la posición en metros, el ángulo de orientación del barco en grados, la velocidad lineal que lleva el barco en nudos, la distancia en metros que le queda para alcanzar el punto de destino en modo autónomo o en caso de que sea requerido, y el tiempo en segundos estimado para la llegada a este destino.

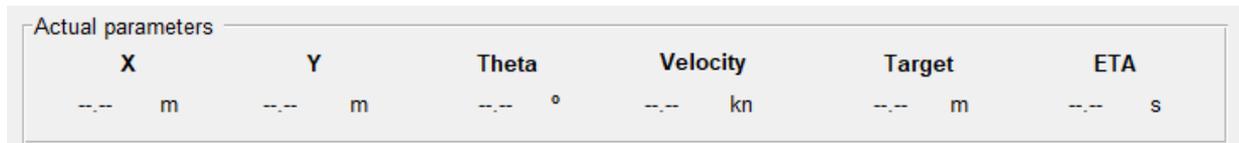


Figura 4.30. Panel de visualización de las variables del sistema.

Estos valores son representados en la pantalla principal, donde podemos ver de forma gráfica como se mueve el barco en el entorno propuesto, su posición, rumbo, etc., y en la otra gráfica en la parte de abajo a la derecha se representará la evolución de la velocidad en el tiempo, para entender mejor que forma tiene la respuesta del sistema.

- **Viento y oleaje**

Para darle más realismo a la simulación se ha añadido un panel (figura 4.31) en el que se puede generar una perturbación, correspondiente al viento y al oleaje, para ver cómo es la respuesta del barco ante estas situaciones. Según la posición de los *slider*, se simulará un viento con las componentes correspondientes a donde éstos *slider* se hayan desplazado.



Figura 4.31. Panel de configuración de la magnitud de las perturbaciones (viento y oleaje).

4.2.1. Adaptaciones del modelo matemático al código

Las ecuaciones diferenciales deben ser discretizadas para poder simular sus valores a lo largo del tiempo en la GUI de MATLAB. Esto también reducirá el grueso de puntos calculados, ya que no es necesaria tal continuidad de las ecuaciones. En la simulación, los valores se obtienen a una frecuencia de 2 Hz (se obtiene un nuevo valor de posición, x e y , orientación, θ , y velocidad, v), y a este intervalo de tiempo lo llamaremos Δt , que será constante durante toda la simulación ($\Delta t = 0,5$ s).

Partiendo de las ecuaciones que anteriormente se han definido como las que describen el modelo, se puede llegar hasta su forma discreta haciendo uso de métodos en diferencias finitas para problemas de contorno [16] para una simulación por eventos discretos, que

simplifican los cálculos de la máquina obteniendo unos valores muy cercanos a las ecuaciones diferenciales de las que se parte.

Si definimos la posición y orientación en cada instante como x_n, y_n, θ_n , las velocidades y aceleraciones generadas estarán definidas en cada instante por los valores de orientación y posición en esos mismos instantes junto a lo que ha ocurrido unos instantes antes:

$$\Delta x_n = x_n - x_{n-1} \quad ; \quad \Delta y_n = y_n - y_{n-1} \quad ; \quad \Delta \theta_n = \theta_n - \theta_{n-1} \quad ; \quad \Delta t = t_n - t_{n-1} = 0,5 \text{ s}$$

Las ecuaciones obtenidas anteriormente eran las siguientes:

$$M a_{x_n} + \alpha v_{x_n} - (F_e + F_b) \cdot \cos \theta = 0 \quad (4.1)$$

$$M a_{y_n} + \alpha v_{y_n} - (F_e + F_b) \cdot \sin \theta = 0 \quad (4.2)$$

$$I a_{\theta_n} + B v_{\theta_n} - (F_e - F_b) \cdot a = 0 \quad (4.3)$$

donde la velocidad se puede definir como

$$v_{x_n} = \frac{\Delta x_n}{\Delta t} = \frac{x_n - x_{n-1}}{\Delta t} \quad ; \quad v_{y_n} = \frac{\Delta y_n}{\Delta t} = \frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta t} \quad ; \quad v_{\theta_n} = \frac{\Delta \theta_n}{\Delta t} = \frac{\theta_n - \theta_{n-1}}{\Delta t}$$

y la aceleración de forma análoga:

$$a_{x_n} = \frac{\Delta v_{x_n}}{\Delta t} = \frac{v_{x_n} - v_{x_{n-1}}}{\Delta t} = \frac{\frac{x_n - x_{n-1}}{\Delta t} - \frac{x_{n-1} - x_{n-2}}{\Delta t}}{\Delta t} = \frac{x_n - 2x_{n-1} + x_{n-2}}{\Delta t^2}$$

$$a_{y_n} = \frac{y_n - 2y_{n-1} + y_{n-2}}{\Delta t^2} \quad ; \quad a_{\theta_n} = \frac{\theta_n - 2\theta_{n-1} + \theta_{n-2}}{\Delta t^2}$$

A continuación, se muestra cómo quedan las ecuaciones discretizadas para intervalos de Δt segundos respecto a su expresión como una función continua, propuesta en los modelos matemáticos de los apartados anteriores:

$$M \frac{x_n - 2x_{n-1} + x_{n-2}}{\Delta t^2} + \alpha \frac{x_n - x_{n-1}}{\Delta t} - (F_e + F_b) \cdot \cos \theta = 0 \quad (4.4)$$

$$M \frac{y_n - 2y_{n-1} + y_{n-2}}{\Delta t^2} + \alpha \frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta t} - (F_e + F_b) \cdot \sin \theta = 0 \quad (4.5)$$

$$I \frac{\theta_n - 2\theta_{n-1} + \theta_{n-2}}{\Delta t^2} + B \frac{\theta_n - \theta_{n-1}}{\Delta t} - (F_e - F_b) \cdot a = 0 \quad (4.6)$$

Como condiciones iniciales en el código se parte de valor 0 en todas las variables. A este valor se le sumaría el que le demos a las condiciones iniciales, simulando los valores que se obtendrían de una señal GPS, de un Compás Electrónico y de un Sistema de Navegación Inercial (INS). En realidad lo que interesa calcular es los valores de x, y, θ , por lo que

despejando estos valores en la ecuación anterior estos quedan tal y como se ha presentado en el código de MATLAB:

$$\begin{aligned} \frac{I}{\Delta t^2} \theta_n + \frac{B}{\Delta t} \theta_n &= \frac{I}{\Delta t^2} (2\theta_{n-1} - \theta_{n-2}) + \frac{B}{\Delta t} \theta_{n-1} + (F_e - F_b) \cdot a \\ \theta_n &= \frac{\frac{I}{\Delta t^2} (2\theta_{n-1} - \theta_{n-2}) + \frac{B}{\Delta t} \theta_{n-1} + (F_e - F_b) \cdot a}{\frac{I}{\Delta t^2} + \frac{B}{\Delta t}} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Para despejar x e y se procede de la misma forma, y además se añadirá a la ecuación el término debido al empuje del viento y el oleaje sobre la embarcación, que hemos optado por dividirlo en componente x y componente y . Para el valor en x se ha asignado signo negativo, ya que se han decidido considerar los vientos de componente Norte y Este como referencia y de valor positivo. Quedan entonces las ecuaciones de la siguiente manera,

$$x_n = \frac{\frac{M}{\Delta t^2} (2x_{n-1} - x_{n-2}) + \frac{\alpha}{\Delta t} x_{n-1} + (F_e + F_b) \cdot \cos \theta - NS}{\frac{M}{\Delta t^2} + \frac{\alpha}{\Delta t}} \quad (4.8)$$

$$y_n = \frac{\frac{M}{\Delta t^2} (2y_{n-1} - y_{n-2}) + \frac{\alpha}{\Delta t} y_{n-1} + (F_e + F_b) \cdot \sin \theta + EW}{\frac{M}{\Delta t^2} + \frac{\alpha}{\Delta t}} \quad (4.9)$$

donde se conocen todos los parámetros y sus valores son los siguientes:

$$M = 160 \text{ kg} ; I = 725 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} ; \alpha = 77,75 ; B = 300 ; \Delta t = 0,5 \text{ s} ; a = 0,8 \text{ m}$$

$$F_e = 21 \cdot v_e ; F_b = 21 \cdot v_b ; v_e, v_b \in [-12, 12] \text{ V} ; NS, EW \in [-25, 25] \text{ N}$$

En lo referido a la propulsión en el modo autónomo se ha añadido un término proporcional a la señal de voltaje, ya que las oscilaciones en el voltaje debidas a la corrección de rumbo indirectamente mermaban la capacidad del barco para moverse a velocidad máxima, y se establecía el equilibrio en torno al valor medio de estas oscilaciones. Se ha estimado su valor en 1,5 equivalente a incrementar en un 50% el voltaje suministrado a los motores. Como en un principio se supuso que el voltaje en los motores no debía superar los 4,8 V, este incremento generará valores de pico de hasta 7,2 V, que sigue siendo menor que los 12 V para los que el motor ha sido diseñado.

Con la adición de estos términos se ve solventado este problema a nivel de simulaciones, aunque en acciones futuras sería posible el estudio de otras alternativas, como recalcular el sistema para que no sean necesarias estas correcciones para compensar las oscilaciones en modo autónomo, o hacer más preciso el sistema de control, más concretamente el bloque condicional que establece el rumbo, considerando para errores pequeños de orientación que las diferencias de voltaje entre ambos motores (que al final es este proceso el que da el rumbo a la embarcación) sean lo suficientemente pequeñas como para que el valor de la velocidad se estabilice lo más

cercano posible al valor requerido y sin que se pierda estabilidad en el proceso de mantener el rumbo¹⁷.

4.2.2. Respuestas del sistema y visualización

Para el modo manual únicamente mencionar que se comprueba que se obtienen los valores de velocidad deseados para el rango de voltaje disponible, por lo que en principio no hay problemas.

En el modo autónomo existe el problema de que no se alcanza la velocidad deseada porque la potencia media que suministran los motores se ve mermada por el hecho de que se están regulando continuamente y se generan escalones entre el valor máximo y mínimo de hasta 3,2 V de diferencia (de -1,6 V a 1,6 V). Es importante tener en cuenta estas oscilaciones en la entrada de voltaje a los motores, por si pudiera dañar el sistema eléctrico de estos al estar sometidos a una constante variación de voltaje en sus componentes.

Como se ha comentado antes, esto se ha solucionado aumentando un 50% el voltaje que tiene que llegar a los motores, para que el valor medio de las oscilaciones sea igual a los 4,8 V que se requieren en modo manual para alcanzar la velocidad de 5 nudos. Podrían plantearse otros métodos para resolver estos problemas, como se ha comentado antes, pero por ahora se ve que es una solución bastante práctica y permite al motor seguir trabajando dentro de su límite.

En el modo autónomo se podrían regular estas condiciones a la hora de corregir el rumbo para que cuando el error de orientación sea muy pequeño la diferencia de potencia de los motores sea menor y como resultado la velocidad obtenida del voltaje medio en los motores se aproxime más a la velocidad de consigna.

A continuación, se muestran las imágenes de las pantallas de control (figuras 4.32 y 4.33) en las que se ve la respuesta del barco ante las señales que se le ha enviado, en primer lugar en modo manual, y después en modo autónomo, partiendo del mismo origen:

¹⁷ Todas estas consideraciones únicamente son válidas en el modo de funcionamiento autónomo.

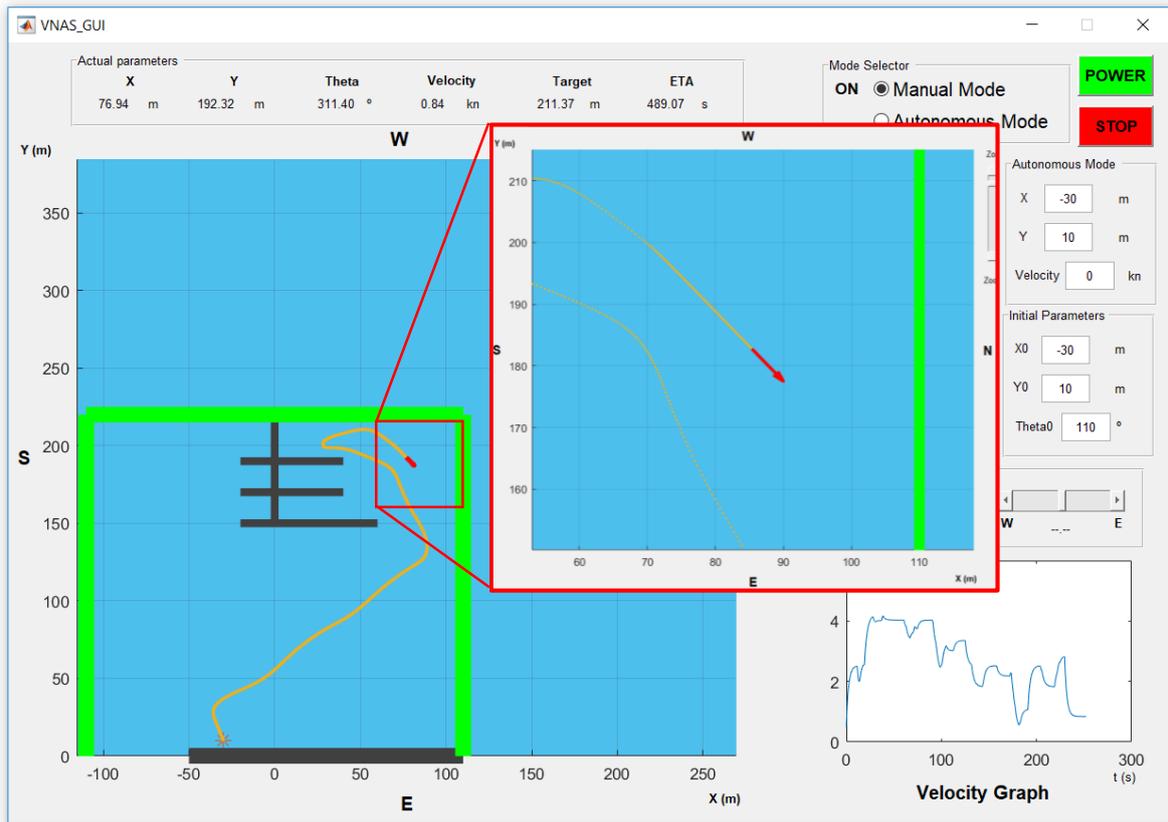


Figura 4.32. Simulación con la UI de MATLAB. Modo Manual.

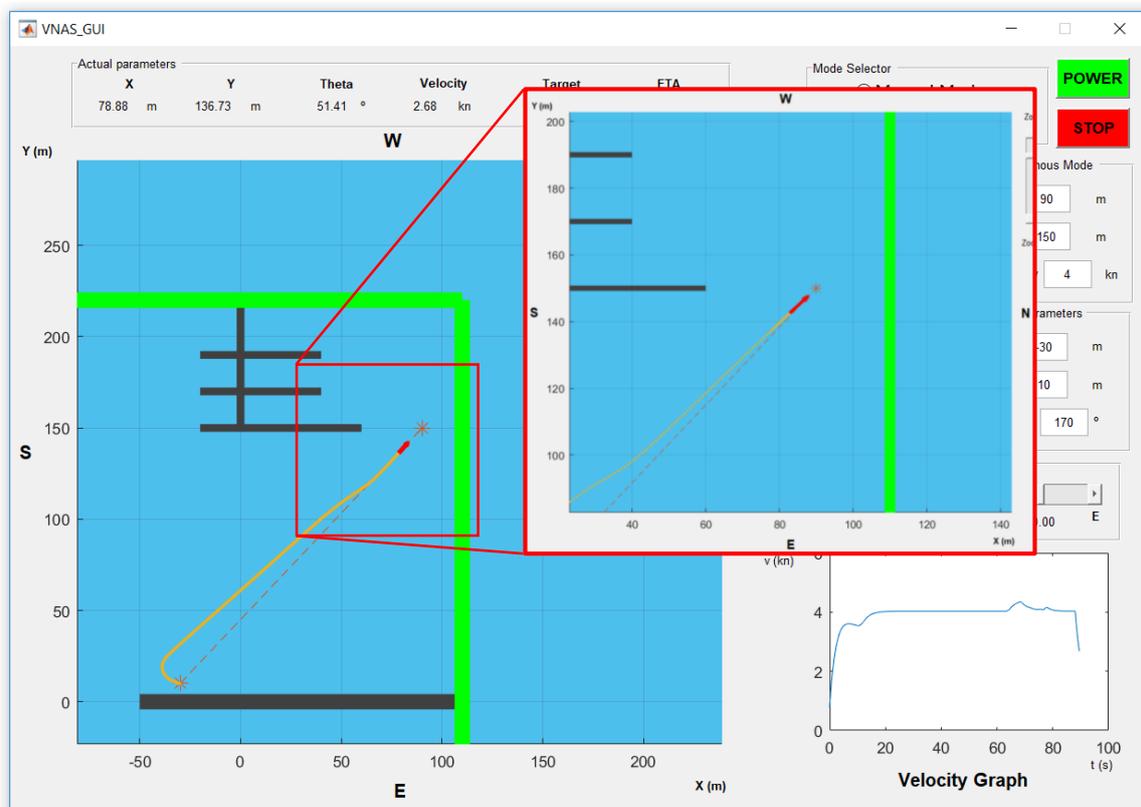


Figura 4.33. Simulación con la UI de MATLAB. Modo Autónomo.

En modo autónomo, si el barco no volviera a recibir una nueva orden, se quedaría oscilando alrededor del punto de destino hasta que se le especifique el siguiente *Waypoint*. Como puede verse en la siguiente imagen (figura 4.34), esta respuesta se parece mucho a las obtenidas en Simulink, lo que parece un buen indicador de que ambos modelos concuerdan.

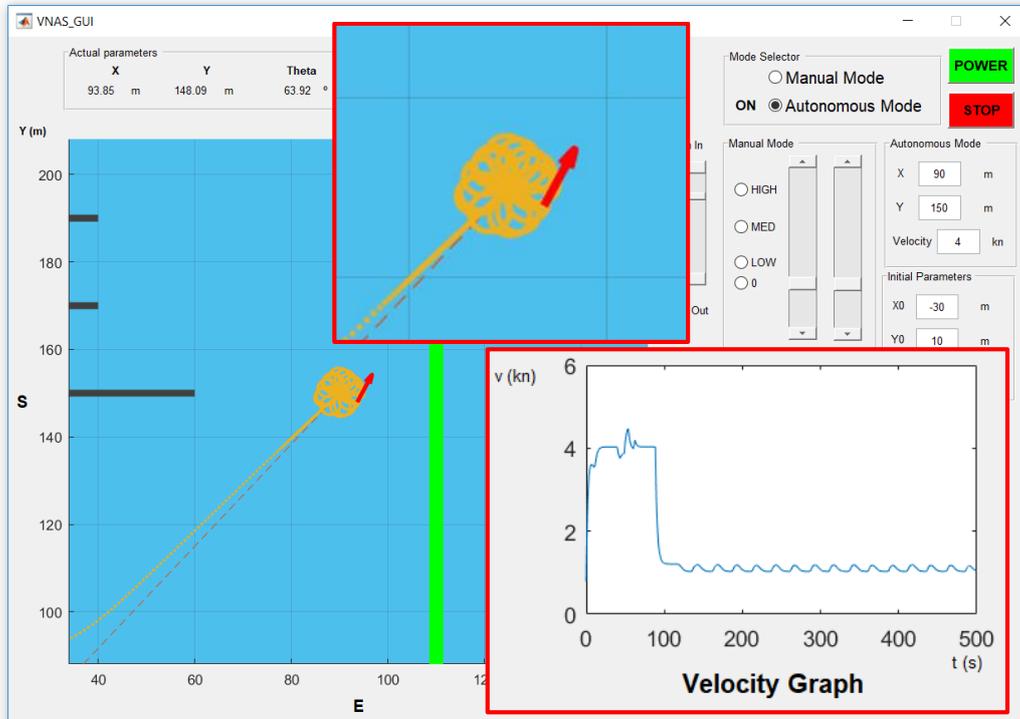


Figura 4.34. Respuesta del barco al alcanzar el *Waypoint*. Modo Autónomo.

4.3. Comparativa de resultados entre Simulink y GUI de MATLAB

En este apartado vamos a suponer las mismas condiciones de funcionamiento tanto para el sistema de control diseñado en Simulink como para el simulador GUI de MATLAB, y así poder comprobar la similitud de ambas respuestas.

El experimento se va a realizar en modo autónomo, para que no haya ninguna acción humana y que las respuestas por ambos sistemas solo dependan de las decisiones que tome el sistema de control, y las condiciones del experimento van a ser las siguientes:

- Condiciones iniciales: $x_0 = 320 \text{ m}$; $y_0 = 375 \text{ m}$; $\theta_0 = 330^\circ$
- *Waypoint*: $x = 200 \text{ m}$; $y = 430 \text{ m}$
- Velocidad de consigna: 4 nudos (kn)
- Perturbaciones: Viento (y oleaje) de componentes Sur (10 N) y Este (20 N)

Habiendo comprobado que hemos tomado las mismas condiciones para los dos simuladores, los resultados que se han obtenido se muestran a continuación:

- En GUI de MATLAB (figura 4.35):

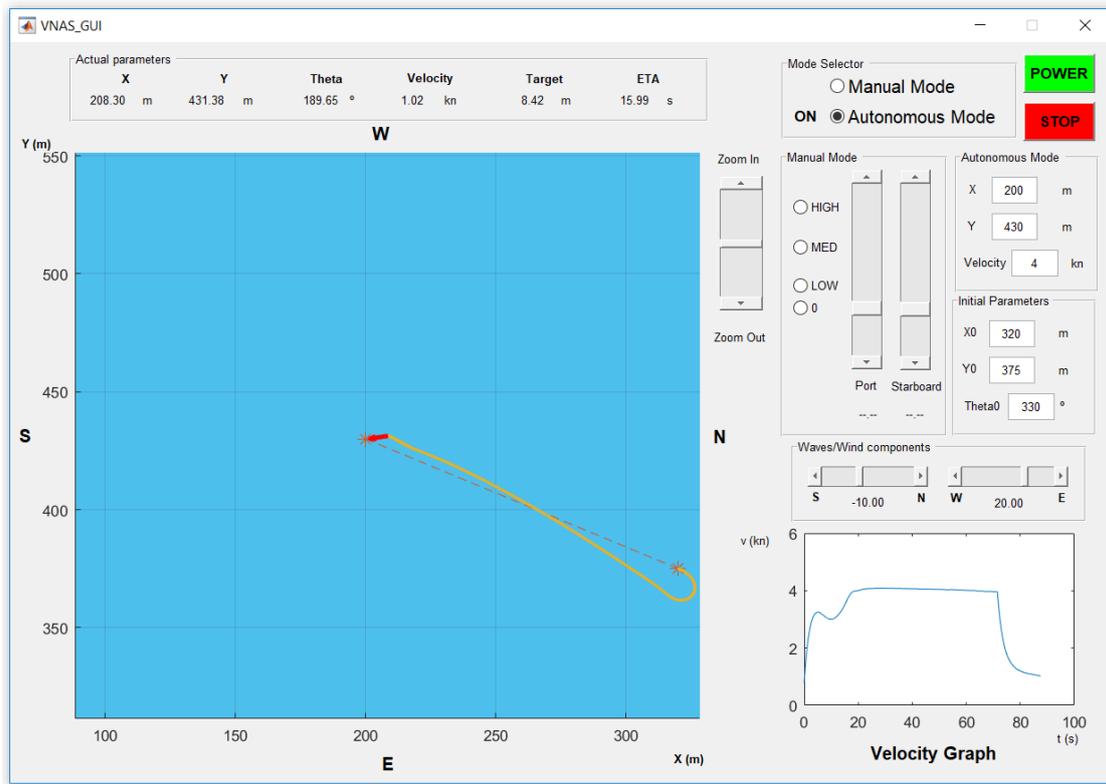


Figura 4.35. Experimento en GUI de MATLAB para las condiciones especificadas.

- En Simulink de MATLAB (figura 4.36 y 4.37):

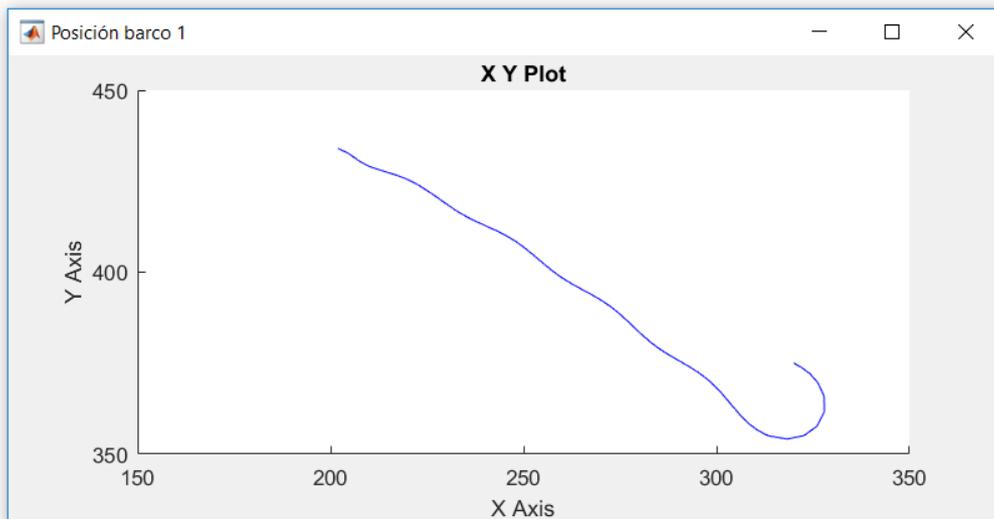


Figura 4.36. Experimento en Simulink para las condiciones especificadas. Posición.

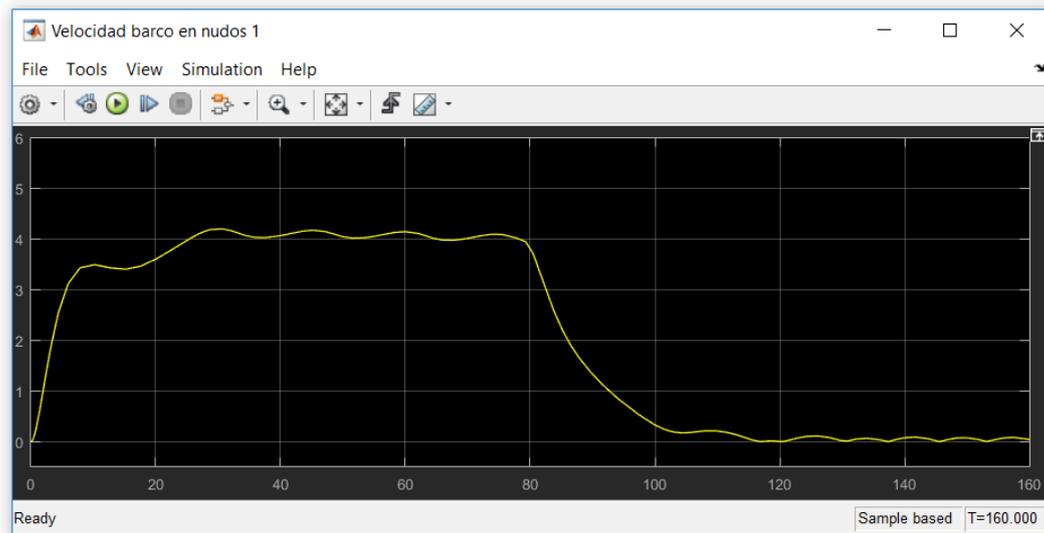


Figura 4.37. Experimento en Simulink para las condiciones especificadas. Velocidad.

Podemos ver que las respuestas de las dos simulaciones son prácticamente idénticas, sobre todo la manera de moverse hasta el *Waypoint* y la forma de la curva de la velocidad. El punto que más difiere entre ambos experimentos es el tiempo que les ha llevado alcanzar el objetivo, fijándonos que en la GUI ha sido de unos 70 segundos, mientras que en Simulink ha sido de unos 80 segundos.

No podríamos decir con seguridad el motivo de a que se deben estas diferencias, pero entre los candidatos estarían la consideración de términos de una respuesta natural en Simulink y no en la GUI, las posibles diferencias en el código al “traducirlo” de Simulink y el hecho de haber discretizado las ecuaciones al programar el sistema de control en código MATLAB. Estamos hablando de un error en el tiempo de simulación de alrededor del 12,5 %, por lo que sería interesante depurar el código y volver a revisar que las respuestas de ambos simuladores sean más similares.

5. Diseño de experimentos y ensayos para la obtención de parámetros

Todas las simulaciones realizadas se han hecho tomando los datos que se han estimado en los apartados anteriores. Ahora bien, una vez se ha comprobado que el sistema de control responde correctamente, es importante empezar a pensar en diseñar los experimentos de campo que servirán para obtener las constantes y parámetros que se acercan más a la realidad del sistema. De manera general, algunos de los experimentos que pueden realizarse son:

- **Relación entre el voltaje en bornes de los motores y la velocidad de giro de la hélice.**

En el laboratorio de Navales, para distintos valores de tensión en bornes de los motores, podemos medir la velocidad de giro de sus hélices y así establecer una relación entre ambos. Habrá que tener en cuenta que cuando el barco se encuentre en el agua la misma agua ejercerá una resistencia al giro de las hélices, por lo que habrá que valorar tanto ensayos en vacío como ensayos en la piscina de pruebas.

- **Relación entre el voltaje en bornes de los motores y la fuerza de propulsión.**

Con este ensayo no se requeriría el anterior, ya que se podría establecer la relación directa entre las dos variables de más interés en el control de los motores.

El ensayo consistiría en atar con un cabo el barco por su parte de atrás a un embarcadero. Con esta configuración se hará que los motores del barco funcionen, ambos al mismo régimen, partiendo de estar parados hasta alcanzar su valor máximo, y para cada caso se medirá la tensión que soportan los cabos. La curva generada se corresponderá con la fuerza de propulsión que los motores ejercen sobre el agua en función de la potencia (o tensión) suministrada a los mismos.

- **Masa total del barco.**

Por diversas limitaciones físicas, como es el tamaño del barco y el problema de transportarlo, es difícil obtener la masa total del barco de manera unificada. La masa del barco se podría calcular por separado de la siguiente manera:

- Masa del casco: el casco se encuentra en la facultad de Navales, por lo que podría ser pesado en el propio laboratorio sin problemas.
- Masa de la plataforma de unión y soporte: se puede obtener de las especificaciones de los materiales.

- Masa de los motores: según las especificaciones del fabricante, los motores pesan 9,23 kg cada uno.
- Masa de la caja estanca con la electrónica: su valor dependerá de la electrónica a bordo, y no será posible conocerlo con exactitud hasta fases finales del proyecto VNAS.
- Masa de las baterías: serán dos baterías, una alimentando cada motor, y su peso por separado rondará los 25 kg.

Otra opción relativa a obtener el valor de la masa total del barco sería pesarlo al levantarlo con una grúa en puerto, antes de botarlo.

- **Dimensiones de la embarcación.**

Las medidas del VNAS se pueden tomar en el laboratorio donde se encuentra en la facultad de Navales. En primera aproximación la geometría del barco se asemejó a la de dos prismas rectangulares unidos por dos barras de masa despreciable y sin ningún aporte a la geometría, simplificando así el modelo para cálculos iniciales. Más tarde, en una de las reuniones del proyecto VNAS, se tomaron medidas más realistas del catamarán, aunque estas solo se mostrarán a modo informativo en los anexos, quedando disponibles para cuando sean de verdad requeridas.

- **Momento de inercia del barco.**

Para calcular el momento de inercia son necesarios los datos de la masa de los componentes del barco y su geometría. El cálculo de la masa de la embarcación se puede hacer de forma más sencilla y precisa, pero su geometría es bastante más compleja que la supuesta inicialmente, que consistía en dos prismas rectangulares. Mediante un programa de modelado o escaneo 3D se podrían obtener las dimensiones de la embarcación de manera muy exacta y podríamos dar un valor del momento de inercia más cercano a la realidad.

- **Resistencia al avance en función de la velocidad de avance.**

Un experimento que podría ser bastante útil para la obtención de este parámetro consiste en remolcar la embarcación [1], con una distancia de cuerda en la que podamos considerar que la estela del remolcador no es influyente en el cálculo de esta fuerza, pero no demasiado larga, ya que podría haber problemas con la catenaria que forma el cabo y los valores tendrían una gran dispersión. Midiendo la tensión en el cabo para distintas velocidades de avance podemos obtener la curva de la resistencia que ejerce el agua sobre el casco en función de la velocidad de avance del barco.

- **Resistencia al giro en función de la velocidad de giro.**

La relación entre la velocidad de giro y la resistencia que opone el fluido a realizar este giro habrá que obtenerla de las propias pruebas del barco una vez botado en el mar. Para distintas configuraciones de diferencia de potencia entre los motores se podrán observar los radios de curvatura que ocupa el catamarán para dar una vuelta respecto a un centro de rotación.

Las variables que habíamos relacionado antes eran la velocidad de giro con el momento que se genera en contra del giro del barco. Se podría estudiar la forma de relacionar el radio de

giro con el momento, suponiendo en un principio linealidad entre ambas y conforme avanzaran los experimentos, con ayuda del sistema de control en Simulink y de la UI, ir acotando su relación.

- **Cálculos hidrodinámicos relacionados con la propulsión de los motores.**

Las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía, la ecuación de Bernoulli para fluidos ideales, el principio de conservación de la cantidad de movimiento..., todas ellas [11] nos pueden servir para obtener fuerzas de propulsión que generan los motores, la potencia requerida/consumida por el barco, caudales de agua desplazados por los motores al generar el empuje sobre el agua, etc.

Hasta ahora, muchos de estos datos no han sido requeridos, sobre todo los parámetros constructivos de los motores y las hélices, ya que no forma parte de este trabajo centrarse en estos conceptos, pero su medición proporcionaría otro punto de vista con el que contrastar los resultados obtenidos para nuestro modelo.

- **Cálculos hidrostáticos: flotación del barco.**

Mediante la aplicación directa del Principio de Arquímedes, se puede obtener un valor próximo a la realidad del calado y del volumen de agua desplazado por el barco, ya que este volumen influirá directamente en la resistencia que ejerce el agua sobre el casco. Existen tablas que para valores específicos de la relación entre velocidad y eslora (en kn y en m), según la masa de agua desplazada se puede saber la potencia que se requiere en los motores para propulsar la embarcación. Estas tablas son muy específicas para cada geometría de casco, aclarando que solo pueden ser fieles a la realidad para tipos de casco similares al de su realización.

6. Conclusiones

Desde que se plantearon los objetivos iniciales de este TFE hasta las últimas consideraciones que han ido surgiendo en paralelo con su realización, estas son las conclusiones a las que se ha llegado:

- **Diseño del sistema de control**

Podemos decir que la respuesta que obtenemos de los sistemas de control planteados es un ejemplo bastante visual de la respuesta que tendrán una vez implantados en un equipo real. Estos simuladores, aparte de proporcionar información sobre cómo responderá nuestro modelo, también podrán ser modificados para otros modelos de embarcación y así facilitar el estudio de otros sistemas en los que se quiera implantar esta misma tecnología.

Las relaciones que se han establecido entre las variables controladas son aptas para las condiciones planteadas, pero no se puede asegurar que lo sean para el caso de aplicaciones reales. Para este punto es necesario un análisis más detallado del modelo, y en algunos casos ensayos y pruebas en el laboratorio.

- **Control manual**

Del control manual podemos decir que responde correctamente según las órdenes que se le envían, de la misma forma que lo haría cualquier barco gobernado desde su propio puesto de mando.

- **Control autónomo**

Respecto al diseño del modo de control, se ha conseguido diseñar un sistema de control capaz de responder ante las señales y perturbaciones a las que se ha sometido el sistema de forma satisfactoria. Se han valorado distintas condiciones de llegada al *Waypoint*, como la distancia del catamarán al punto de destino, que hace disminuir la velocidad conforme sea menor la distancia del barco al objetivo, o la propia velocidad de consigna, constante a no ser que sea modificada manualmente.

Cuando el control de la velocidad se ha realizado por medio de la distancia al objetivo se ha visto que el sistema responde muy bien cuando alcanza el *Waypoint* y tiene que mantener su posición hasta la orden de ir al punto siguiente. Sin embargo, por el control con la velocidad de consigna la respuesta del barco en puntos cercanos al destino es más inestable, lo que puede provocar reacciones bruscas indeseadas para el sistema.

Los sistemas propuestos en lazo cerrado proporcionan mayor control de la velocidad cuando el modelo está trabajando en la parte estacionaria de la misión, compensando mejor las perturbaciones provocadas por el viento y la ondulación del mar, hasta un 50 % mejor que en lazo abierto, aunque sin llegar a compensarlo del todo, por lo que habría que seguir estudiando más detalladamente estas respuestas del sistema.

- **Estabilidad ante las perturbaciones propuestas**

En general, conseguir diseñar un sistema de control capaz de compensar las perturbaciones del medio es una tarea bastante compleja y que por el momento queda pendiente, ya que, con las soluciones propuestas, aunque mejora bastante la respuesta de la embarcación, no se llega a alcanzar la velocidad de consigna. Esto es debido a que son los propios motores los que se encargan de corregir el rumbo, y en los casos en los que el viento desvía el barco de su rumbo la prioridad del sistema es corregir el rumbo para que el barco siempre pueda trazar una línea recta hasta el *Waypoint*.

El resultado es que la potencia en uno de los motores disminuye y en otro aumenta para poder seguir el mejor rumbo posible, pero aun así no se consigue evitar que el barco se desplace de su rumbo inicial. Además, como la potencia de los motores se ha limitado para que el barco no sobrepase los 5 nudos, ante grandes perturbaciones el sistema sería incapaz de responder de manera efectiva, por lo que el rango de trabajo en el caso de implementarlo en una embarcación real quedaría limitado a aguas tranquilas y a condiciones meteorológicas favorables. Estas condiciones las podemos encontrar sobre todo en aguas cerradas, como la dársena de un puerto o incluso, por nuestra localización geográfica, en el Mar Menor, que se convierte en una zona de estudio bastante interesante.

- **Simulaciones**

De las simulaciones podemos sacar una información realmente útil, ya que de una forma muy visual se representa tanto los parámetros principales a controlar como las gráficas de la trayectoria del barco y su velocidad a lo largo del recorrido, sin entrar en detalles de qué es lo que está ocurriendo dentro del sistema de control.

La realización de estas simulaciones y su comprobación para asegurarnos que son correctas ha sido en todo momento el objetivo final a alcanzar en este TFE, y de ellas podemos decir que, para las condiciones y sistemas planteados, las respuestas han sido generalmente satisfactorias.

- **Estado actual de la tecnología**

También, durante la búsqueda de documentación y referencias sobre sistemas de navegación autónoma, se ha observado el rumbo que ha tomado esta tecnología con el paso de los años, que empezó como pequeños sistemas de toma automática de datos en el mar, y que ha pasado a visualizarse como el siguiente nivel a alcanzar en el transporte de pasajeros y mercancías a nivel global.

Actualmente, la inmensa mayoría de los proyectos realizados tienen como objetivo final implantarse como el futuro del tránsito comercial marítimo en el mundo. Alrededor del 90 % del transporte marítimo de todo el planeta está proyectado en torno al comercio [17], y toda esta tecnología, que ha venido desarrollándose desde finales del siglo pasado, ha visto su hueco en el mercado presentándose como la forma más segura y eficiente para realizar trayectos marítimos, abaratando principalmente costes energéticos, de mano de obra y los precios marcados por las compañías aseguradoras.

El mensaje que transmiten sus desarrolladores es que durante la próxima década esta tecnología se hará mucho más potente, aumentando su presencia en el mundo del transporte marítimo y desempeñando labores totalmente de forma autónoma.

7. Posibles aplicaciones y ampliaciones futuras

Para el diseño de este sistema de control, aunque por el momento no se ha trabajado en aplicaciones reales, en todo momento se ha tenido en cuenta la tarea futura de su implementación en un controlador real para montarlo en el catamarán del proyecto VNAS. Por ahora, este simulador nos dará la capacidad de poder visualizar de forma realista las respuestas del modelo que hemos planteado para valorar como de preciso es el control sobre la embarcación y si es necesario hacer modificaciones en el mismo. Es ahora cuando podemos evaluar nuevas posibilidades que se nos abren:

- **Conocer la respuesta de distintos modelos**

El simulador realizado puede servirnos para estudiar el control de distintas embarcaciones, modificando los parámetros del sistema físico según corresponda. Entonces se podrán hacer modificaciones concretas en el sistema de control para que se adapte al modelo de cada embarcación. También gracias a las simulaciones somos capaces de comprender de forma aproximada cuales son las respuestas del sistema para las condiciones dadas. Podemos conocer como varía el voltaje en los motores, cual es la reacción del barco a estas variaciones, incluso podemos identificar las variables más útiles a la hora de establecer condiciones en el control del sistema.

- **Mejora del control PID**

Una de las posibles mejoras que habría que tener en cuenta antes de subir el equipo al barco es un mejor estudio para un control PID del sistema. Por el momento el control que estamos realizando sobre las variables es un control proporcional condicionado, ya que es más sencillo de calcular y las respuestas del sistema son bastante correctas. Aun así, calcular unos valores de PID precisos mejoraría la respuesta del sistema.

- **Proyecto VNAS**

La consecución de los objetivos de este TFE es el punto de partida de una de las partes en las que se divide el proyecto multidisciplinar inter-escuelas de la UPCT al que se le ha llamado VNAS. El proyecto consiste en el desarrollo de una embarcación autónoma por parte de las escuelas de Navales (ETSINO), Teleco (ETSIT) e Industriales (ETSII), en colaboración con Humberto Martínez Barberá. Cada una de las escuelas tiene asignada una tarea en el proyecto, por lo que siempre se tiene que trabajar pensando en la compatibilidad de las ideas propuestas. De forma general, los objetivos principales de cada escuela en el proyecto VNAS son:

- Por parte de Navales, realizar los pertinentes cálculos de estructura y flotabilidad del barco, así como el diseño de la disposición de los equipos en el barco (anclaje de motores, caja estanca, baterías, etc.).
- Por parte de Teleco, diseñar el sistema de telemetría y control remoto de la embarcación para poder ser controlada desde una estación base.

- Y por parte de Industriales, diseñar un sistema de control autónomo para el barco. “El sistema debe permitir que el barco tome sus propias decisiones de cara a misiones y situaciones simples. El barco debe ser capaz de seguir un rumbo, mantener una cierta velocidad y ser capaz de ir a un punto dado. Todos estos comportamientos y sistemas se deben poderse activar, desactivar, monitorizar y configurar desde un panel de control” [9].

- **Ampliaciones sobre un futuro sistema ya embarcado**

Como ampliaciones futuras sería interesante la adición de sensorización, tanto relacionada con la toma de datos ambientales atmosféricos y meteorológicos como sensorización para el medio submarino, como batimetría, toma de parámetros de las aguas, y así establecer mallas de datos en periodos de tiempo relativamente breves para representar el estado de una zona amplia del medio natural en un determinado momento, y con una importante reducción en los costes de ejecución.

En el supuesto de que este sistema estuviera implantado en el catamarán, se podría aprovechar el intercambio de información que permite el control del barco para dotarlo de más capacidades [1], como son las tareas de patrulla u vigilancia, inspección de puertos, batimetría, toma de muestras y registro de datos oceánicos, etc.

Si se considera el Mar Menor como zona de acción, la información que nos sería más útil es la toma de datos en zonas de vertido, lo que ayudaría a exigir un control más minucioso de su emisión y repercutiría tanto en la salud de estas zonas como en el interés social [1], muy ligado al cuidado del medio ambiente.

- **Otros proyectos**

Cuando se empezó a hablar del proyecto VNAS también se consideró como uno de los objetivos a alcanzar el participar en el Microtransat Challenge, que consiste en una carrera transatlántica entre embarcaciones autónomas de menos de 4 metros de eslora, y que tienen que completar el recorrido entre las islas británicas y la costa este de Estados Unidos o viceversa, retransmitiendo su posición al menos una vez cada seis horas y sin intervención humana. Aunque el primer impedimento que nos encontramos es que la embarcación de este proyecto es de 6,5 metros de eslora, pero la electrónica podría adaptarse para una embarcación más pequeña, ya que el principal objetivo de este proyecto consiste en que el sistema de control sea capaz de dirigir la embarcación correctamente y que esta responda de forma eficiente.

8. Bibliografía y referencias

- [1] H. Martínez Barberá, «Vehículo Autónomo para Aplicaciones Marinas - Memoria,» Murcia, 2005.
- [2] H. Martínez Barberá, «Vehículo Autónomo para Aplicaciones Marinas - Informe Final,» Murcia, 2005.
- [3] AUV Lab, «AUV Laboratory at MIT Sea Grant,» [En línea]. Available: <https://auvlab.mit.edu/vehicles/vehiclespecASC.html>. [Último acceso: 2019].
- [4] IST Lisboa, 2006. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/232618256_Vehicle_and_Mission_Control_of_the_DELFIM_Autonomous_Surface_Craft. [Último acceso: 2019].
- [5] Rolls Royce, «Breaking Waves,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.breakingwaves.fi/wp-content/uploads/2018/12/SVAN-presentation.pdf>.
- [6] Rolls Royce, «Rolls Royce,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2018/25-01-2018-rr-opens-autonomous-ship-research-and-development-centre-in-finland.aspx>.
- [7] C. Nealon, «University of Buffalo,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.buffalo.edu/news/releases/2015/10/012.html>.
- [8] T. Lindeman, «Vice,» 2018. [En línea]. Available: https://www.vice.com/en_us/article/ne95qm/autonomous-boats-will-be-here-before-self-driving-cars.
- [9] F. J. Pereda, «Sistema de telemetría y control de un barco autónomo,» Madrid, 2010.
- [10] J. Chaves, A. Picado y J. M. Steller, «Aplicaciones de Control en Barcos,» 2005.
- [11] A. Viedma Robles, Ingeniería de Fluidos, Cartagena.
- [12] H. Martínez Barberá, Interviewee, [Entrevista]. 2019.

- [13] «Danish Wind Industry Association,» [En línea]. Available: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/calculat.htm>.
- [14] «Fondear,» [En línea]. Available: http://www.fondear.org/infonautic/Mar/El_Mar/Olas_Velocidad/Velocidad_Olas.htm.
- [15] «Windfinder,» [En línea]. Available: https://es.windfinder.com/forecast/mar_menor_la_manga.
- [16] D. Martínez Martínez, Apuntes de la asignatura de Cálculo Numérico, 3º GITI, Cartagena, 2016.
- [17] «iContainers,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.icontainers.com/es/2017/09/22/transporte-maritimo-representa-90-del-comercio-mundial/>.
- [18] «Amazon,» [En línea]. Available: <https://www.amazon.es/Jago-ETBM03-1-fueraborda-el%C3%A9ctrico-propulsora/dp/B00JKL7512>.
- [19] «Airmar,» 2010. [En línea]. Available: http://www.airmar.com/uploads/Brochures/gps_heading_products1.pdf. [Último acceso: 2019].
- [20] «Waveinn,» [En línea]. Available: https://www.waveinn.com/nautica-pesca/raymarine-dst800-analogic-triducer/578313/p?utm_source=google_products&utm_medium=merchant&id_product.
- [21] «NMEA,» [En línea]. Available: <https://www.tronico.fi/OH6NT/docs/NMEA0183.pdf>.
- [22] A. González Redel, «Diseño e implementación de la telemetría de un barco autónomo,» Cartagena, 2019.
- [23] J. Feliu Battle, Apuntes de Regulación Automática 3º GITI, Cartagena, 2016.
- [24] 2018. [En línea]. Available: <https://www.breakingwaves.fi/wp-content/uploads/2018/12/SVAN-presentation.pdf>.

9. Anexos

ANEXO I. Proyecto VAMAR

- **Esquema general**

La visión más general que se tiene del proyecto VAMAR, estación base, tipo de conexión inalámbrica, electrónica embarcada y sistema físico, se muestra en la siguiente imagen:

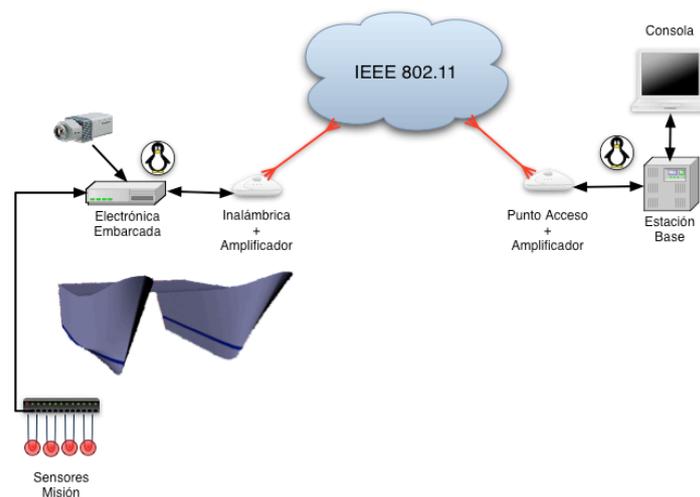


Figura 9.1. Esquema general para el modelo del proyecto VAMAR [1].

- **Disposición de la electrónica embarcada**

Al igual que se plantea en el proyecto VAMAR, como este proyecto está aún en su fase inicial lo más práctico es que cuando se vaya a implementar el sistema en el barco, esté dotado de una estructura modular, para que si se da la posibilidad de hacer una ampliación de sensorización o de cualquier otro tipo no sea necesario modificar los módulos existentes. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo del esquema general de conexionado de los distintos módulos a través de un bus CAN, pero que puede servir para hacerse una idea de en qué consistirá la electrónica embarcada [1]:

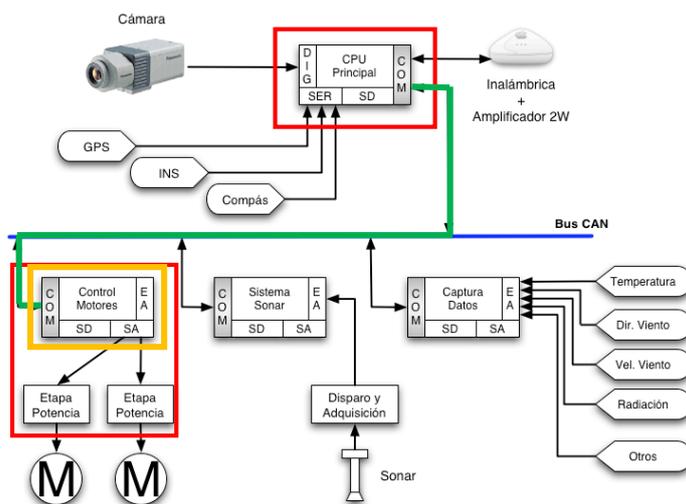


Figura 9.2. Esquema del conexionado por bloques de la electrónica embarcada en el proyecto VAMAR [1].

Representado en rojo y en verde se muestra las partes en las que se va a centrar el proyecto actual VNAS por parte de Telecomunicaciones e Industriales: adquisición de datos de la sensorización, tratamiento de los mismos por parte del sistema de control y transmisión de potencia a los motores. En amarillo se ha resaltado la parte que ocupa a este TFE, que es el diseño del sistema de control que da autonomía a la embarcación.

ANEXO II. Proyecto VNAS

IIa. Elección de materiales y sistemas

A continuación, se van a explicar brevemente los instrumentos que se han seleccionado para la fase inicial del proyecto VNAS, de los que ya se están obteniendo los datos requeridos por parte de los trabajos hechos por la Escuela de Telecomunicaciones:

- **Motores JAGO 900W 24Vdc:**

Los motores seleccionados para ir embarcados serán dos motores JAGO eléctricos idénticos de 55 libras de empuje y 636 W [18] de potencia que funcionarán conectados a una batería de 12 V en continua. Estos motores vienen preparados para ser controlados manualmente desde un timón que da la opción de variar la velocidad de la hélice, incluso en sentido inverso, pero donde irán embarcados recibirán las ordenes de variar su velocidad desde la estación base, sin necesidad de ser intervenidos por un tripulante.



Figura 9.3. Motor eléctrico JAGO 55 lb - 12Vdc – 0,636 kW.

- **Compás ciego AIRMAR H2183 NMEA 2000:**

El compás proporcionará el dato de la orientación del barco en cada instante, que será utilizado para compararlo con el valor del rumbo deseado, obtenido a través de cálculos con los datos medidos en la instrumentación embarcada. También proporciona los ángulos de rodadura y cabeceo, aunque por ahora no son requeridos por el sistema de control [19].



Figura 9.4. Compás ciego AIRMAR.

- **Smart TRIDUCER AIRMAR DTS800:**

Va instalado en el casco, completamente sumergido, para proporcionar valores de profundidad, temperatura del agua, y velocidad del barco en cada momento, que será el dato requerido por el sistema de control para mostrarlo por pantalla o en caso de un control en lazo cerrado, para corregir el error de velocidad. Es sabido que para velocidades bajas los sistemas GPS pierden fiabilidad a la hora de medirlas [9]. Además, para este sensor en concreto, en sus especificaciones se dice que proporciona valores muy precisos para velocidades inferiores a los 5 nudos [20]. En aplicaciones reales será mucho más fiable obtener la velocidad de este sensor que del GPS, aunque en el diseño del sistema de control se obtenga la velocidad de observar como varía su posición.



Figura 9.5. Smart TRIDUCER AIRMAR.

- **Antena GPS GARMIN 19X 10Hz NMEA 2000:**

La antena GPS será la que proporcione la posición instantánea del catamarán, que será utilizada para compararla con el *Waypoint* al que se quiere ir para estimar la distancia y el tiempo hasta el destino¹⁸ (este último conociendo también la velocidad del barco).



Figura 9.6. Antena GPS GARMIN.

- **Anemómetro con veleta RAYMARINE:**

El anemómetro y la veleta servirán para conocer la velocidad y la dirección del viento respectivamente. Será un dato meramente informativo para la estación base, pero permitirá conocer en qué condiciones está trabajando el barco y por si fuera necesario controlarlo manualmente, asistirlo durante su ruta o hacer que aborte su misión para evitar daños mayores.



Figura 9.7. Anemómetro con veleta RAYMARNE.

Todas las variables medidas por estos sensores son volcadas en forma de trama en el estándar NMEA 0183 a la RPi objeto de estudio de la parte de telecomunicaciones, y que es la

¹⁸ ETA: Estimated Time of Arrival (Tiempo Estimado de Llegada).

que lleva instalado el software de navegación de Humberto Martínez Barberá [2]. Esta aplicación representa en una interfaz gráfica la posición del barco en un mapa además de todos estos datos proporcionados por los instrumentos.

Entonces esta RPi enviará las mismas tramas a la RPi que tendrá instalado el sistema de control diseñado en este TFE. Los datos que se requieren para la navegación serán interpretados y de esta forma el sistema de control enviará la señal de tensión requerida a los motores.

IIb. Programación del sistema de control en Raspberry Pi

Para el proyecto VNAS se ha elegido hacer la implementación del código de control en una Raspberry Pi. La adquisición de datos se hace a través de otra RPi, que los enviará por puerto serie hasta la que tiene el código de control para poder ser utilizados.

Los datos requeridos se enviarán en forma de trama según el modelo seguido por el estándar NMEA 0183 [21], uno de los estándares más utilizado en navegación. Este estándar define requisitos de señales eléctricas y protocolos de datos para comunicaciones entre instrumentos marinos.

Las tramas que se requerirán serán una que contenga la posición GPS, otra con la velocidad dada por el sensor y otra con la potencia que requieren los motores. Dependiendo del modo de funcionamiento en el que nos encontremos serán requeridas unas u otras:

- Para el modo de funcionamiento manual los datos que necesita el sistema de control son una trama en la que se defina el voltaje que se debe suministrar a los motores para dirigir el catamarán. No existe una trama NMEA para estas señales, por lo que habrá que establecer de qué forma se van a transmitir estos datos para la compatibilidad de los sistemas desarrollados por cada escuela.
- En el caso del modo de funcionamiento autónomo, los datos que se requerirán son la trama que contenga el *Waypoint* al que se quiere llegar y otra trama donde se especifique la velocidad a la que se desea ir. El sistema de control será capaz de interpretar estos datos y realizar los cálculos pertinentes que traduzcan esta información en una señal de potencia voltaje para los motores.

La programación de la Raspberry Pi se pretende hacer en Java, aunque el lenguaje utilizado no tiene por qué ser ninguno en concreto mientras que los datos que se reciban por el puerto serie sigan el formato NMEA 0183 y el código implementado sea capaz de interpretarlos.

Por parte de Telecomunicaciones [22], se están haciendo pruebas de transmisión de las siguientes tramas de datos:

- GLL: proporciona la latitud y longitud del sistema, entre otros datos.
- RMC: proporciona la información mínima recomendada para la navegación, como es la latitud y longitud del barco, la velocidad en nudos, hora, fecha, etc.

GLL Geographic Position – Latitude/Longitude

```

      1      2 3      4 5      6 7
      |      | |      | |      | |
$--GLL, llll.ll, a, yyyyy.yy, a, hhmss.ss, A*hh

```

- 1) Latitude
- 2) N or S (North or South)
- 3) Longitude
- 4) E or W (East or West)
- 5) Time (UTC)
- 6) Status A - Data Valid, V - Data Invalid
- 7) Checksum

Figura 9.8. Trama NMEA 0183 con información de localización del barco.

RMC Recommended Minimum Navigation Information

```

      1      2 3      4 5      6 7 8 9 10 11|
      |      | |      | |      | | | | |
$--RMC, hhmss.ss, A, llll.ll, a, yyyyy.yy, a, x.x, x.x, xxxx, x.x, a*hh

```

- 1) Time (UTC)
- 2) Status, V = Navigation receiver warning
- 3) Latitude
- 4) N or S
- 5) Longitude
- 6) E or W
- 7) Speed over ground, knots
- 8) Track made good, degrees true
- 9) Date, ddmmyy
- 10) Magnetic Variation, degrees
- 11) E or W
- 12) Checksum

Figura 9.9. Trama NMEA 0183 de información mínima para la navegación.

Sería necesario implementar también a la obtención de estas tramas NMEA 0183, las tramas relativas al rumbo y distancia al Waypoint, que es la que permitirá el control autónomo, estableciendo el *Waypoint* en coordenadas UCT, y la relativa a las condiciones atmosféricas para la navegación, en concreto la velocidad y dirección del viento:

BWC Bearing and Distance to Waypoint – Latitude, N/S, Longitude, E/W, UTC, Status

```

                11
          1      2      3 4      5 6  7 8  9 10 | 12  13
          |      |      | |      | |  | |  | |  | |  |
$--BWC,hhmmss.ss,llll.ll,a,yyyy.yy,a,x.x,T,x.x,M,x.x,N,c--c*hh
    
```

- 1) Time (UTC)
- 2) Waypoint Latitude
- 3) N = North, S = South
- 4) Waypoint Longitude
- 5) E = East, W = West
- 6) Bearing, True
- 7) T = True
- 8) Bearing, Magnetic
- 9) M = Magnetic
- 10) Nautical Miles
- 11) N = Nautical Miles
- 12) Waypoint ID
- 13) Checksum

Figura 9.10. Trama NMEA 0183 con información del rumbo y del Waypoint.

MWV Wind Speed and Angle

```

          1  2 3  4 5
          |  | |  | |
$--MWV,x.x,a,x.x,a*hh
    
```

- 1) Wind Angle, 0 to 360 degrees
- 2) Reference, R = Relative, T = True
- 3) Wind Speed
- 4) Wind Speed Units, K/M/N
- 5) Status, A = Data Valid
- 6) Checksum

Figura 9.11. Trama NMEA 0183 con información de las condiciones del viento.

ANEXO III. Tipos de embarcaciones autónomas

Si no fijamos en el mundo de los vehículos marinos no tripulados, nos encontramos con la siguiente clasificación [1]:

- *ROV* – Remotely-Operated Vehicle. Los ROV son submarinos de pequeño tamaño controlados desde la superficie en un buque, y la conexión entre ambos es por medio de un cable, lo que limita la zona de trabajo.
- *AUV* – Autonomous Underwater Vehicle. Los AUV son robots que se mueven bajo el agua, controlados desde la superficie, que realizan una misión de forma autónoma, y en la medida de lo posible transmiten información sin tener conexión física, usando transmisión acústica.

- *USV* – Unmanned Surface Vessel. Los USV son embarcaciones ligeras que se controlan a distancia desde un buque-control, utilizando enlaces de radiofrecuencia para el intercambio de información.
- *ASC* – Autonomous Surface Craft. Los ASC son embarcaciones ligeras que realizan una misión de forma autónoma, y la transmisión de información se realiza mediante enlaces de radiofrecuencia.

ANEXO IV. Modelado del sistema electro-mecánico

El modelado del sistema eléctrico que regula la velocidad de giro de la hélice (que se traduce en un empuje) con la diferencia de potencial creada en bornes del motor es bastante simple, ya que responde al esquema de un circuito RL que alimenta un motor que hace girar un eje [23]:

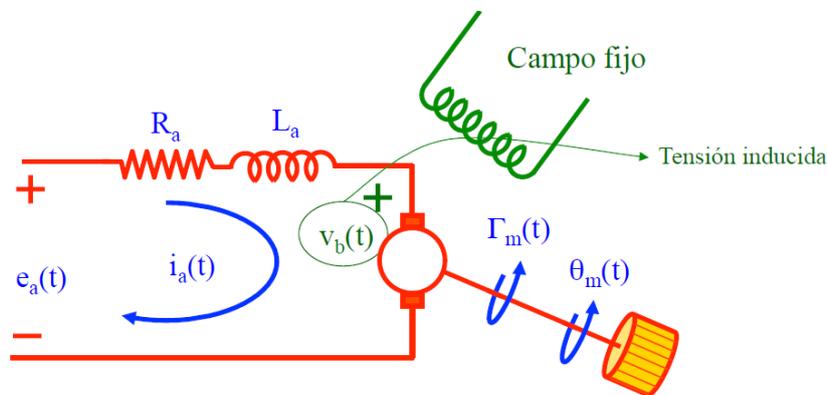


Figura 9.12. Esquema del sistema electromecánico de los motores embarcados [23].

$$v_b(t) = K_b \frac{d\theta_m(t)}{dt} \rightarrow v_b(s) = K_b s \theta_m(s)$$

$$R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + v_b(t) = e_a(t) \rightarrow (R_a + L_a s) I_a(s) + V_b(s) = E_a(s)$$

$$\Gamma_m(t) = K_t i_a(t) \rightarrow \Gamma_m(s) = K_t I_a(s)$$

PARTE ELÉCTRICA:
$$E_a(s) = K_b s \theta_m(s) + \frac{(R_a + L_a s)}{K_t} \Gamma_m(s)$$

$$\Gamma_m(t) = J_m \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} + D_m \frac{d\theta_m(t)}{dt} \rightarrow \Gamma_m(s) = (J_m s^2 + D_m s) \theta_m(s)$$

PARTE MECÁNICA: $\Gamma_m(s) = (J_m s^2 + D_m s) \theta_m(s)$

PARTE ELEC.-MEC.: $E_a(s) = K_b s \theta_m(s) + \frac{(R_a + L_a s)}{K_t} (J_m s^2 + D_m s) \theta_m(s)$

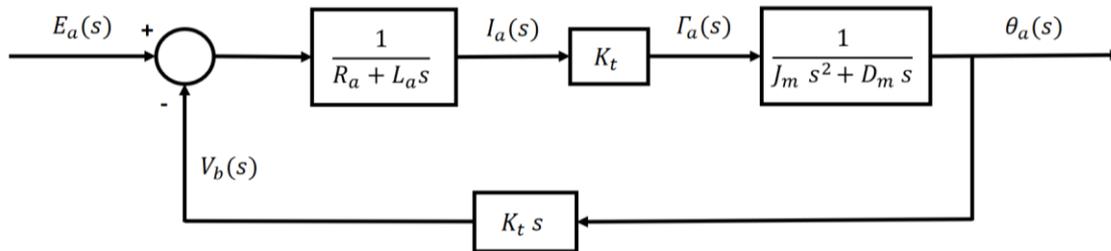


Figura 9.13. Diagrama de bloques del sistema electro-mecánico [23].

Si asumimos que $L_a \ll R_a$, la función de transferencia queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} &= \frac{1}{K_b s + \frac{R_a}{K_t} (J_m s^2 + D_m s)} = \frac{1}{s \left(K_b + \frac{R_a}{K_t} (J_m s + D_m) \right)} = \\ &= \frac{1}{s \left(K_b + \frac{R_a J_m}{K_t} s + \frac{R_a D_m}{K_t} \right)} \frac{\frac{K_t}{R_a J_m}}{\frac{K_t}{R_a J_m}} = \frac{\frac{K_t}{R_a J_m}}{s \left(s + \frac{R_a D_m + K_b K_t}{R_a J_m} \right)} = \frac{K_1}{s (s + k)} \end{aligned}$$

Pero la función de transferencia que realmente interesa es la que relaciona la velocidad angular de la hélice con la diferencia de potencial en los motores, siendo ésta:

$$\frac{\dot{\theta}_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K_1}{(s + k)} \approx \frac{1}{(Ts + 1)}$$

Por simplicidad, representaremos la función de transferencia como se ha expresado en último lugar, siendo T la constante de tiempo que caracteriza al sistema electro-mecánico. En primera aproximación supondremos un valor para nuestro sistema de $T = 2$, pero deberá ser recalculado y ajustado por medio de medidas tomadas en los ensayos que correspondan.

ANEXO V. Nomenclatura

para expresar el movimiento de una embarcación, así como las fuerzas y momentos aplicados en ella, se utiliza la siguiente notación estándar, aplicada normalmente en tareas de maniobra y control de barcos. Los que son de interés en nuestro modelo son sobre todo los términos referidos a la posición y a los ángulos, y a partir de estos hemos representado las velocidades y aceleraciones que se han requerido [10]:

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

Figura 9.14. Nomenclatura utilizada para describir el movimiento de un barco.

ANEXO VI. Capa límite terrestre

Rugosidad							
Clase	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0
Long. (m)	0.0002	0.0024	0.03	0.055	0.1	0.4	1.6
150 m	6.43	6.05	5.53	5.37	5.2	4.74	4.14
140 m	6.4	6.01	5.48	5.32	5.15	4.68	4.08
130 m	6.36	5.97	5.43	5.27	5.10	4.62	4.01
120 m	6.33	5.93	5.38	5.22	5.04	4.56	3.94
110 m	6.28	5.88	5.32	5.16	4.98	4.49	3.86
100 m	6.24	5.83	5.26	5.09	4.91	4.41	3.77
90 m	6.19	5.77	5.19	5.02	4.84	4.33	3.68
80 m	6.13	5.71	5.12	4.94	4.75	4.24	3.57
70 m	6.07	5.63	5.03	4.85	4.66	4.13	3.45
60 m	6	5.55	4.93	4.75	4.55	4.01	3.31
50 m	5.91	5.45	4.81	4.62	4.42	3.86	3.14
40 m	5.8	5.33	4.67	4.47	4.26	3.68	2.94
30 m	5.67	5.17	4.48	4.28	4.06	3.45	2.68
20 m	5.47	4.95	4.22	4	3.77	3.13	2.31
10 m	5.14	4.57	3.77	3.53	3.27	2.57	1.67

Figura 9.15. Velocidad del viento en función de la altura al suelo y la rugosidad del terreno [13].

ANEXO VII. Escala Internacional para clasificar el estado del mar

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

Figura 9.16. Escala Internacional del estado del mar (Douglas).

ANEXO VIII. Sistemas basados en el control autónomo de un barco mediante motores fijos y un timón

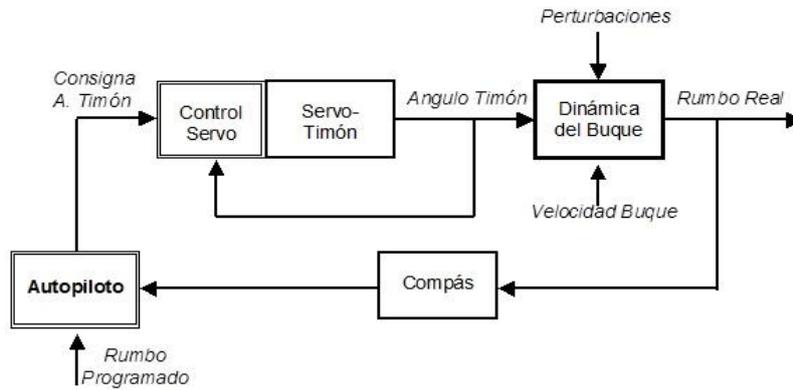


Figura. 9.17. Esquema simplificado del sistema de control en una embarcación autónoma propulsada por motores y dirigida por un timón [10].

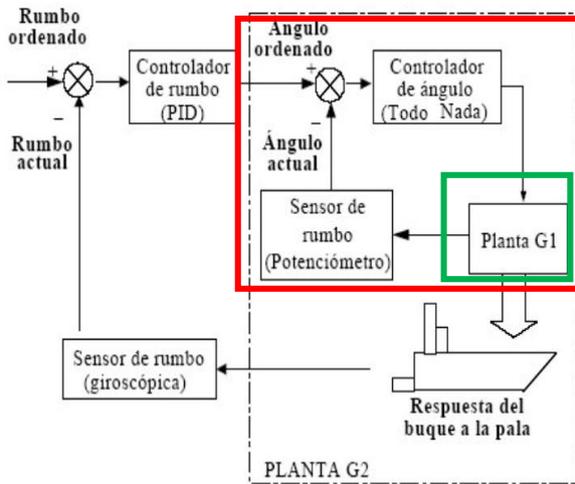


Figura 4: Lazo principal de control, afuste de dirección y posición del buque [7].

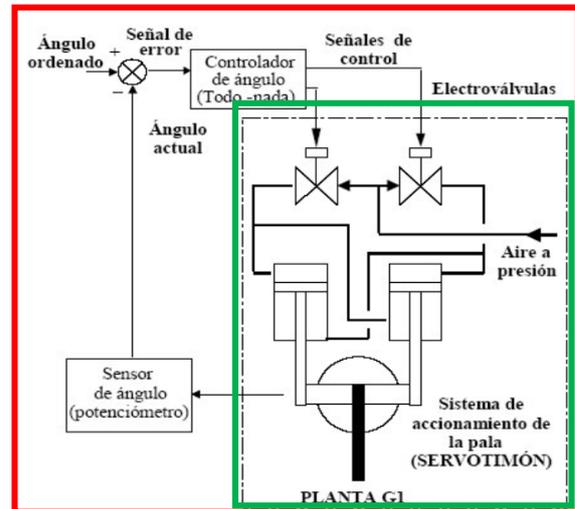


Figura 3: Lazo secundario de control, afuste del ángulo de timón [7].

Figura 9.18. Control del rumbo por medio de un sistema de piloto automático [10].

Este sistema se corresponde con el de un barco en el que se regula el ángulo del timón. En nuestro caso lo que se pretende regular es la potencia de los motores de forma diferencial. Esto será lo que haga que el barco corrija su rumbo, por lo que se parte de la misma idea y únicamente habría que redefinirla para sustituir la planta G1 (sistema que controla el servo-timón) por los controladores de las potencias de los motores.

ANEXO IX. Dimensiones del catamarán utilizado en el proyecto VNAS

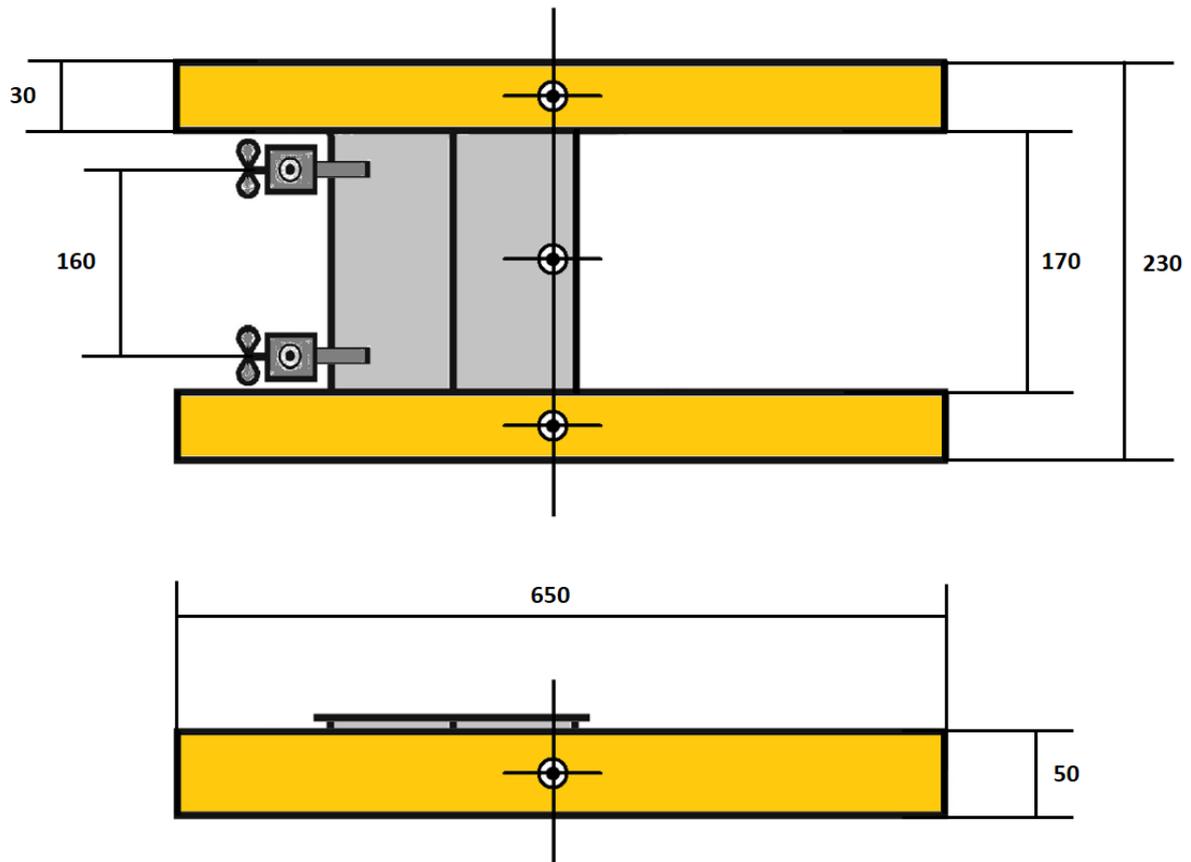


Figura 9.19. Dimensiones del catamarán del proyecto VNAS (en cm).

ANEXO X. Visión general del sistema de control en Simulink

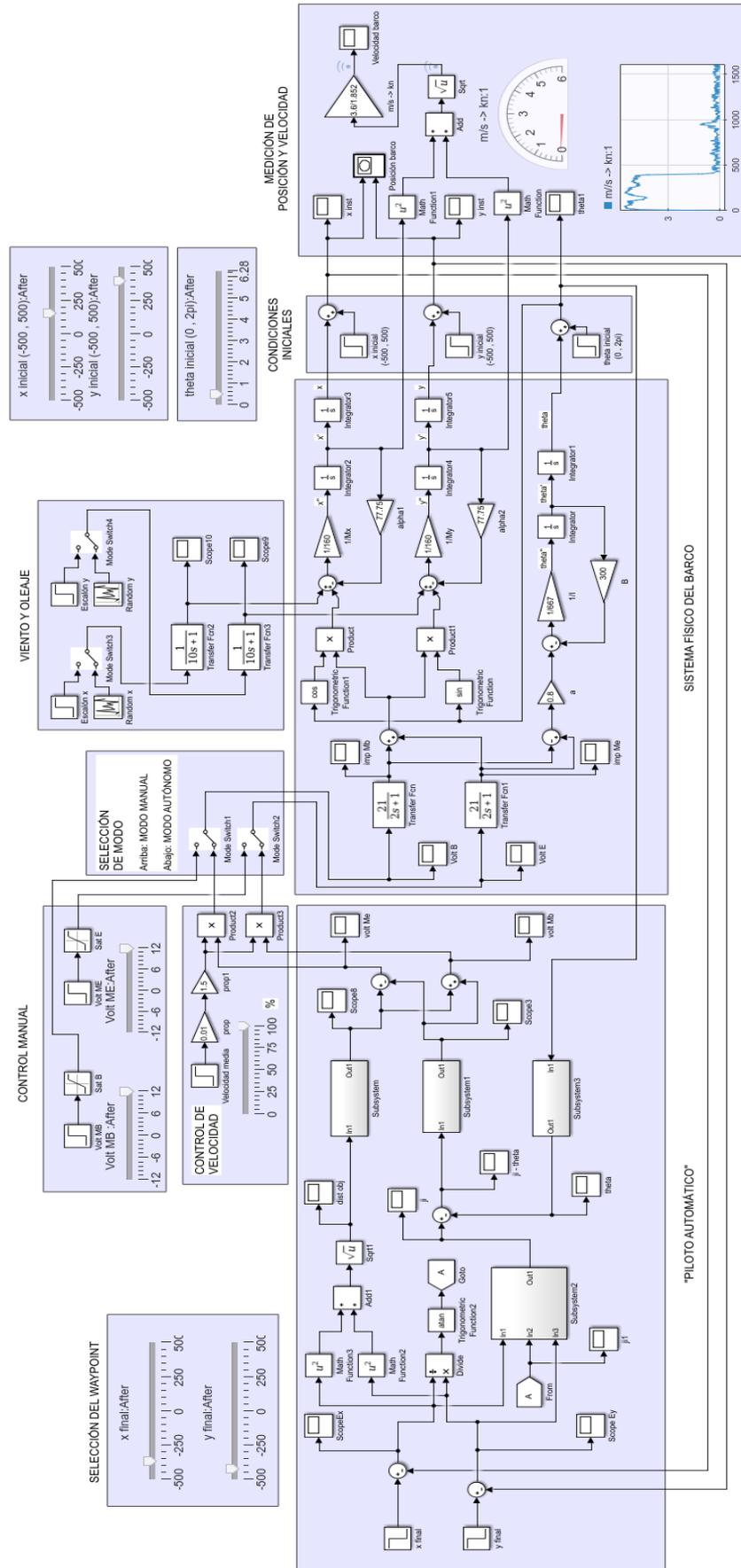


Figura 9.20. Sistema de control del catamarán en Simulink.

