

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍAS

Título: DISEÑO Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL PARA LA NAVEGACIÓN DE UN VEHÍCULO SEMIAUTÓNOMO DE SUPERFICIE

Autor: JHEIFER MANUEL PAEZ ALMENTERO

Jurado

Jurado

Director:

Cartagena, Noviembre de 2018

DISEÑO Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL
PARA LA NAVEGACIÓN DE UN VEHÍCULO
SEMIAUTÓNOMO DE SUPERFICIE

JHEIFER MANUEL PAEZ ALMENTERO

Director: Eugenio Yime Rodríguez, Ph.D.

Co director: Jairo Cabrera Tovar, Ph.D.

Universidad Tecnológica de Bolívar
Facultad de Ingenierías
Programa de Ingeniería Eléctrica
Cartagena

Noviembre 13 de 2018

DISEÑO Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL
PARA LA NAVEGACIÓN DE UN VEHÍCULO
SEMIAUTÓNOMO DE SUPERFICIE

JHEIFER MANUEL PAEZ ALMENTERO

Trabajo de grado para optar al título de

Magíster en Ingeniería con Énfasis en Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Director: Eugenio Yime Rodríguez, Ph.D.

Co director: Jairo Cabrera Tovar, Ph.D.

**Universidad Tecnológica de Bolívar
Facultad de Ingenierías
Cartagena**

Noviembre 13 de 2018

Resumen

Los vehículos marinos no tripulados representan una solución cada vez más atractiva a todas las misiones que se desarrollan sobre ambientes acuáticos como inspección, vigilancia, investigación, monitoreo ambiental, desminado, entre otras. Los problemas involucrados en su desarrollo se pueden agrupar bajo tres áreas, las cuales son: guiado, navegación y control. Estas otorgan inteligencia, lectura del exterior más el movimiento y son ampliamente estudiadas con el fin de mejorar las técnicas utilizadas. En este estudio se presenta un repaso del modelamiento de las embarcaciones con el fin de implementar un control que satisfaga las necesidades de movimiento a lo largo de una ruta. También se presenta el filtrado de las señales del sistema de navegación mediante el filtro extendido de kalman (EKF). Se realiza una simulación del sistema y se valida experimentalmente donde se ve que la metodología propuesta es suficiente.

Palabras claves: Robótica marina, Monitoreo ambiental, Filtro extendido de kalman, vehículos semiautónomos.

Abstract

The unmanned marine vehicles represent an increasingly attractive solution to all the missions that are on aquatic environments such as inspection, surveillance, research, environmental monitoring, transportation, demining, among others. The problems can be grouped under three large areas, which are guided, navigation and control. These areas provide intelligence, reading from the outside more movement and are studied in order to improve the techniques used. In this study, we have a review of the modeling of the boats in order to implement a control that satisfies our movement needs along a route and we go into the filtering of the signals of the navigation system by the extended kalman filter (EKF). A simulation of the system is performed and experimentally validated where the proposed methodology is valid.

Keywords: Marine robotics, Environmental monitoring, Extended kalman filter, semi-autonomous vehicles.

Agradecimientos

Quiero agradecer a Dios por permitir adentrarme en el estudio de las embarcaciones marinas, por todo lo que ha colocado en mi vida, por mi madre, mi padre y mis hermanos.

También quiero agradecer a mi familia, especialmente a mi madre que ha estado para mí en los momentos que más lo necesito.

Agradezco a cada una de las personas que me han apoyado directa o indirectamente para la ejecución de este estudio; a mi director Eugenio Yime, por todo el conocimiento y momentos compartidos.

Por último, no menos importante quiero agradecer a mi novia, Juny, que me ha apoyado incondicionalmente y celebra conmigo cada uno de los avances en este proyecto.

JHEIFER MANUEL PAEZ ALMENTERO

Índice general

1. Presentación	13
1.1. Objetivos	13
1.1.1. Objetivo General	13
1.1.2. Objetivos Específicos	13
1.2. Planteamiento del Problema	13
1.3. Justificación del Proyecto	15
2. Introducción	16
3. Marco teórico	18
3.1. Sistemas de Navegación	19
3.1.1. Calibración de los Sensores	20
3.1.2. Filtro de Kalman	21
3.2. Sistemas de Guiado	22
3.3. Modelamiento y Control	24
3.3.1. Clasificación del Modelo	24
3.3.2. El Modelamiento Cinemático y Dinámico	26

Modelamiento del Sistema de Propulsión	37
3.3.3. El Control	39
Ley de Control	39
Teoría Fundamental de Lyapunov's	40
Método Directo de Lyapunov's	40
3.4. Ensayos con Modelos Libres	41
3.4.1. Maniobra de Círculo de Giro	42
3.4.2. Maniobra de Zigzag	44
3.4.3. Maniobra de Parada	45
4. Desarrollo del Sistema	46
4.1. El Modelo para Simulación	46
4.1.1. Simulaciones de Maniobrabilidad	48
4.2. El Control de Rumbo	52
4.3. Preparación del Sistema de Navegación	57
4.3.1. Calibración de los Sensores	57
4.3.2. El filtro Extendido de Kalman, Estimación de Orientación y Posición	61
4.4. Simulaciones	66
5. Resultados y Discusión	70
6. Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros	78

Lista de Figuras

3.1. Vector error de trayectoria	23
3.2. Path following	24
3.3. Clasificación según número de Froude [18]	25
3.4. Sistemas de coordenadas de referencia	26
3.5. Nomenclatura para movimiento de vehículos marinos	27
3.6. Vector de posición	28
3.7. Tipos de cargas hidrodinámicas [15]	30
3.8. Métodos para obtener parámetros hidrodinámicos	36
3.9. Fuerzas sobre el timón [39]	38
3.10. Funciones definidas positivas [36]	41
3.11. Prueba de círculo de giro [7]	43
3.12. Prueba de zigzag [7]	44
3.13. Prueba de parada [7]	45
4.1. Prueba de círculo de giro	48
4.2. Prueba de círculo de giro, rata de giro y velocidad de avance	49
4.3. Yaw vs tangente	50

4.4. Ángulo en yaw vs la tangente de la ruta	50
4.5. Prueba de Zig Zag	51
4.6. Prueba de Zig Zag Rudder angle vs Yaw	51
4.7. Modelo de simulink para calibración de constante para control de rumbo	54
4.8. Yaw deseado VS Yaw real entrada paso	55
4.9. Yaw deseado VS Yaw real entrada rampa	56
4.10. Yaw deseado VS Yaw real	56
4.11. Salida de sensores y^s sin calibrar	59
4.12. Salida de Sensores \hat{y}^s calibrada	60
4.13. Diferencia entre sistemas de referencia de sensores de la IMU	63
4.14. Salida de sensores \hat{y}^s transformadas	64
4.15. Relación entre las salidas \hat{y}^s de acelerómetro y magnetómetro trans- formadas y la orientación inicial del barco	65
4.16. Modelo en simulink del EKF	66
4.17. Ruta deseada VS Ruta real usando trajectory tracking	67
4.18. Modelo en simulink de path following para las simulaciones	68
4.19. Ruta deseada VS Ruta real usando path following	69
5.1. Implementación de vector tangente a la ruta [32]	70
5.2. Modelo en simulink de las pruebas [32]	71
5.3. Detalle del bloque ship [32]	72
5.4. Resultados de prueba 1 de círculo	73

5.5. Error de posición para prueba 1 de círculo	74
5.6. Resultados de prueba de línea recta	74
5.7. Error de posición para prueba de línea	75
5.8. Resultados de prueba de cuadrado	75
5.9. Error de posición para prueba de cuadrado	76
5.10. Resultados de prueba 2 de círculo [32]	76
5.11. Error de posición para prueba 2 de círculo[32]	77
5.12. USV en pruebas en el lago [32]	77

Lista de Tablas

3.1. Nomenclatura para movimiento de vehículos marinos	27
4.1. Resultados de maniobra de círculo de giro	49
4.2. Resultados de maniobra de Zig Zag	52

Capítulo 1.

Presentación

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Modelar, diseñar, simular y validar el sistema de control de un vehículo semiautónomo basado en su modelo dinámico.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Modelar dinámicamente el vehículo.
- Diseñar una ley de control para la navegación autónoma del vehículo.
- Simular el control autónomo del vehículo en Matlab.
- Validar el comportamiento del vehículo bajo condiciones realistas.

1.2. Planteamiento del Problema

La implementación de un vehículo autónomo o semiautónomo de superficie involucra la interconexión de los sistemas de Guiado, Navegación y Control o (Guidance, Navigation, and Control, GNC, por sus siglas en inglés) estos sistemas son los responsables

de que la embarcación cumpla su misión.

El sistema de guiado es el encargado de establecer la ruta, trayectoria y velocidad, entre otros parámetros, que debe tener el vehículo para que se traslade de forma efectiva entre dos puntos de interés. El sistema de navegación se encarga de ubicar espacialmente el vehículo respecto a un sistema de referencia local, midiendo para ello los parámetros actuales del movimiento del vehículo, como son: posición, velocidad y aceleración, entre otros. El sistema de control recoge la información del sistema de navegación para proceder a accionar los actuadores del vehículo de manera que se haga seguimiento de los valores establecidos por el sistema de guiado.

Los sistemas GNC han sido ampliamente estudiados y se han documentado muchas soluciones para los problemas que se ven involucrados pero todavía existen diversos temas de investigación como son, entre otros: la identificación y evasión de obstáculos en el caso del guiado [12], la implementación de sistemas de navegación que permitan ubicar al vehículo en zonas donde los sistemas convencionales no funcionan o la implementación de un sistema de control para un determinado tipo de embarcación, casco o condición ambiental [28].

El problema que se abarca en el presente trabajo consiste en darle solución a un sistema de GNC de un vehículo autónomo de superficie que sea capaz de medir variables de calidad de agua durante su recorrido. Para ello se procederá a realizar el modelo dinámico del barco, diseñar un filtro de kalman para el sistema de navegación y construir una ley de control para el sistema de control.

1.3. Justificación del Proyecto

En la actualidad, los vehículos marinos autónomos se muestran como una alternativa viable desde el punto de vista económico y funcional para todo tipo de aplicaciones debido a los beneficios que representa diseñar la embarcación en función de la misión y no en función de las necesidades del personal que la guía. Este aspecto podría ser explotado en beneficio de la conservación de cuerpos de agua de Cartagena si se comienza a implementar esta tecnología en la región. En la literatura se observa que el número de trabajos científicos publicados donde se hace uso de vehículos marinos no tripulados para monitoreo ambiental se ha disparado en la última década [1]. Se muestran avances de todo tipo de áreas, en la parte de guiado se pueden distinguir dos enfoques, uno que se centra en visitar la mayor cantidad de puntos de muestreo en el menor tiempo posible, como es el caso de [25] y [5], mientras que el otro enfoque recurre a modelar el fenómeno estudiado para identificar los puntos de muestreo más informativos, como por ejemplo [20] y [26]. También se observan capacidades ampliadas para toma de muestras, los avances presentados en [21] y [16] permiten tomar datos y muestras en columnas de agua de hasta 50m de profundidad. Otros avances muestran la simbiosis entre vehículos no tripulados de diferentes tipos para extender las capacidades de cada uno por separado, como por ejemplo [33] y [6]. Para un análisis más detallado y otros avances se puede consultar [32].

Capítulo 2.

Introducción

Los Vehículos Marítimos No tripulados o (Un-Manned Vehicles, UMV, por sus siglas en inglés) se dividen en tres tipos: Vehículos de superficie no tripulados (Un-Manned Surface Vehicles, USV, por sus siglas en inglés) los cuales son variantes de barcos o motos acuáticas que trabajan en la superficie del agua o semi-sumergidos; los vehículos submarinos no tripulados o (Un-manned Underwater Vehicles, UUM, por sus siglas en inglés) los cuales generalmente se refieren a plataformas sin cordón umbilical o amarre o a plataformas con navegación automatizada y que tienden a ser más pequeños que sus contrapartes USV[11]. Por ultimo, existen los vehículos remotamente operados o (Remote Operated Vehicles, ROV, por sus siglas en inglés), los cuales son una variante de un UUM con un cordón umbilical, el cual le permite obtener alimentación eléctrica, transmitir datos y recibir señales de control[28].

Los vehículos autónomos marítimos han sido ampliamente usados en aplicaciones oceánicas tales como en la industria Oil and Gas[28],[12] y más recientemente en ambientes estuarios y fluviales [11], militares [37], vigilancia para descubrir la presencia de contaminantes [10], Inspección de estructuras sumergidas post-desastres[28], entre muchos otros. Las ventajas que presenta esta tecnología radican en que a diferencia

de los vehículos tripulados, estos no se diseñan con base a las restricciones impuestas por un tripulante humano, tales como: temperatura, espacio, movimiento, etc. Sino que se diseñan con base a la misión específica, aparte de que no se limitan por ambientes extremadamente hostiles o peligrosos para humanos, como son los ambientes contaminados por desechos nucleares o con condiciones de mar muy gruesas [37]. En países donde la mano de obra es costosa, las tareas peligrosas están pasando a ser realizadas por vehículos autónomos [28], incluso a nivel militar, debido a que con el tiempo las armas se están haciendo más efectivas y por ende está dejando de ser viable colocar personal en medio de situaciones peligrosas, personal que muchas veces es altamente entrenado.

Capítulo 3.

Marco teórico

Sistemas de navegación guiado y control

En vehículos no tripulados el sistema de navegación, guiado y control se encarga de obtener la ubicación actual del vehículo con respecto a un sistema de referencia (navegación) para determinar la ruta y la velocidad que debe seguir el vehículo (guiado), lo cual se transforma en órdenes para un sistema de control [34, 17].

El sistema de guiado debe contar con la suficiente inteligencia para lograr una navegación de forma segura e independiente, identificando las condiciones ambientales[4], los objetivos, detectar y evadir obstáculos. Pero esta característica sigue siendo uno de los temas más difíciles ya que aunque se han adelantado muchas investigaciones [35, 24] aún hay temas por resolver y mejorar en el reconocimiento de los objetivos[12] y evasión de obstáculos[37]. También hay otras áreas de trabajo en las cuales se sigue investigando, como son el control y maniobrabilidad en condiciones extremas o en presencia de escombros[28].

Mientras el vehículo lleva a cabo estas acciones es necesario que el vehículo integre sus movimientos con las embarcaciones en su vecindad, lo cual hace común el uso

de vehículos semi-autónomos debido a que para aumentar la confiabilidad, la forma más fácil es contar con supervisión humana[12], pero esto no elimina el riesgo, ya que según estadísticas los errores humanos están presentes en la mayoría de las colisiones en el mar y por esta razón hay trabajos como en [29] donde el guiado de la embarcación se basa en las regulaciones internacionales para prevenir colisiones en el mar (COLREGs, siglas en inglés).

3.1. Sistemas de Navegación

Una parte importante de los sistemas de navegación son los llamados attitude and heading reference system (AHRS). Los AHRS utilizan la información obtenida de diferentes sensores tridimensionales, como son los acelerómetros y giróscopos a cuya agrupación se le conoce como unidad inercial o IMU por sus siglas en inglés y magnetómetros acelerómetros y giróscopos o MARGs también por sus siglas en inglés. El magnetómetro y el GPS comúnmente se usan para corregir los errores acumulativos inherentes a las unidades inerciales. Los AHRS entregan la orientación con respecto a un sistema fijo en tierra uniendo toda la información a través de algoritmos de fusión de sensores, como es el caso del filtro extendido de Kalman el cual es una versión genérica de estos algoritmos, aunque también hay algoritmos de aplicaciones específicas como es el caso de [14],[22] o [23]

Una de las ventajas de los sensores de este tipo de implementación es su bajo peso

y tamaño reducido lo cual ha ayudado a popularizar su uso, pero con importantes desventajas, los sensores de bajo costo se caracterizan por entregar señales de baja resolución sujetas a niveles altos de ruido y un bias variable en el tiempo[13], esto obliga a realizar una calibración precisa de los sensores.

3.1.1. Calibración de los Sensores

Debido al bajo desempeño de los sensores de bajo costo, es necesario realizar una calibración adicional a la que realiza el fabricante con el objetivo de reducir los errores hasta un nivel aceptable para aplicaciones más complejas, en muchos casos esta calibración debe realizarse en línea ya que las condiciones que llevan a que la salida del sensor sea ruidosa pueden cambiar durante la operación. Se ha elegido un tipo de calibración consistente en ajustar la salida de los sensores a una esfera unitaria centrada en el origen por medio de la determinación de tres parámetros de escala y tres parámetros de offset para cada sensor [13]. El problema de calibración lo podemos escribir de esta forma:

$$\hat{y}^s = \Lambda (y_f^s - b^s) = \Lambda y_f^s - \Lambda b^s \quad (3.1)$$

Donde y_f^s es la salida del sensor y \hat{y}^s es la salida recalibrada del sensor, ambas con respecto al sistema de referencia atado al sensor, y $\Lambda = (\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3) > 0$ y $b^s = [b_1, b_2, b_3]^t$ son los factores de escalado y offset, correspondientemente.

3.1.2. Filtro de Kalman

Los sistemas de referencia de actitud y rumbo no leen la orientación del vehículo, pero si pueden hacer medidas sobre la aceleración y velocidad angular instantánea de los mismos, estas son usadas para estimar el estado actual del sistema, el cual puede ser, por ejemplo la orientación, pero estas medidas al ser ruidosas, inducen errores acumulativos y no acumulativos, es por esto que los algoritmos de fusión de sensores tienen un papel muy importante en los sistemas de referencia y orientación, no solo uniendo las medidas de los distintos sensores entre sí, sino también uniéndolas con diferentes modelos que describen el sistema para obtener una medida con menos errores y correcciones a los errores acumulativos. Adicionalmente, en la mayoría de las condiciones operacionales, la trayectoria deseada varía lentamente debido a las cargas de segundo orden inducidas por las olas, viento y corrientes en comparación con el movimiento oscilatorio de primer orden inducido por las ondas, por lo que es necesario evitar el movimiento de primer orden porque causa desgaste en los propulsores y sistemas de hélice. Este problema se soluciona usando un modelo basado en un estimador de estado espacial (normalmente un filtro de Kalman), un controlador PID en cascada con un filtro de banda muerta y/o filtro pasa bajos.

El filtro de extendido de kalman o EKF por sus siglas en inglés tiene las siguientes tres etapas:

Predicción:

$$\hat{x}_{k+1/k} = f(\hat{x}_{k/k}); \hat{x}_{0/0} = x_i \quad (3.2)$$

$$\hat{P}_{k+1/k} = F_k \hat{P}_{k/k} F_k^t + W; \hat{P}_{0/0} = W \quad (3.3)$$

Donde:

$$F_k = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\hat{x}_{k/k}} \quad (3.4)$$

Calculo de ganancia de Kalman:

$$K_{k+1} = \hat{P}_{k+1/k} \hat{G}_{k+1}^t \left(K_{k+1} \hat{P}_{k+1/k} \hat{G}_{k+1}^t + V \right)^{-1} \quad (3.5)$$

Donde:

$$G_k = \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_{\hat{x}_{k/k}} \quad (3.6)$$

Actualización:

$$\hat{x}_{k+1/k+1} = \hat{x}_{k+1/k} + K_{k+1} (y_k - g(\hat{x}_{k+1/k})) \quad (3.7)$$

$$\hat{P}_{k+1/k+1} = (I - K_{k+1} G_{k+1}) \hat{P}_{k+1/k} \quad (3.8)$$

3.2. Sistemas de Guiado

El sistema de guiado es el que se encarga de indicar al vehículo como y adonde moverse para alcanzar su objetivo.

Como vemos en [18] este trabaja en conjunto con el sistema de control para lograr:

- **Estabilización en punto**, lo cual se consigue cuando la posición y orientación son constantes.

Seguimiento de trayectoria, cuando los valores deseados aparte de posiciones y orientaciones cambiantes en el tiempo incluyen velocidades y aceleraciones. En este tipo de guiado, usualmente se usan modelos de referencia que permiten mantener a cada una de estas variables dentro de rangos alcanzables por el modelo real.

En el seguimiento de trayectoria normalmente se desarrollan tres tipos de escenarios como son: line of-sight (LOS), pure pursuit (PP) y constant bearing (CB). Nosotros exploraremos el escenario de pure pursuit, donde se usa el vector formado entre el punto de trayectoria deseado y el vehículo, \vec{R} en la figura 3.1 para calcular la velocidad deseada y orientación de la embarcación.

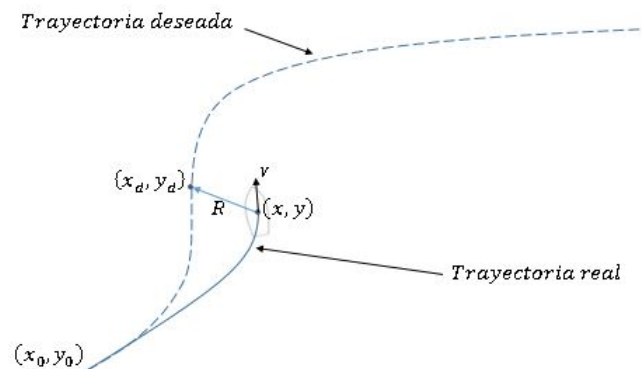


Figura 3.1: Vector error de trayectoria

- **Seguimiento de ruta**, este último tipo de guiado, no hay restricciones de tiempo, por lo tanto el vehículo alcanza un conjunto de puntos de referencia sin tener en cuenta cuánto le toma, su velocidad o aceleración.

En este caso, los puntos de referencia o setpoints se le van entregando al sistema

de control a medida que la embarcación va cumpliendo con la ruta; en el ejemplo de la figura 3.2 se define un error permisible máximo ilustrados como círculos en la imagen, cuando el error cae a ese valor se actualiza el setpoint al siguiente.

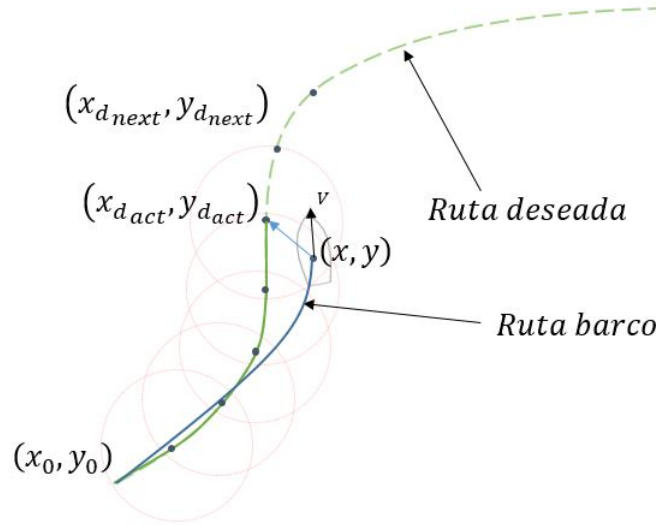


Figura 3.2: Path following

3.3. Modelamiento y Control

El modelamiento presentado en esta sección se basa en el planteamiento desarrollado en [18], el cual es la referencia principal.

3.3.1. Clasificación del Modelo

Los vehículos marinos pueden ser clasificados según su velocidad máxima, para lo cual es común usar el Número de Froude:

$$Fn = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (3.9)$$

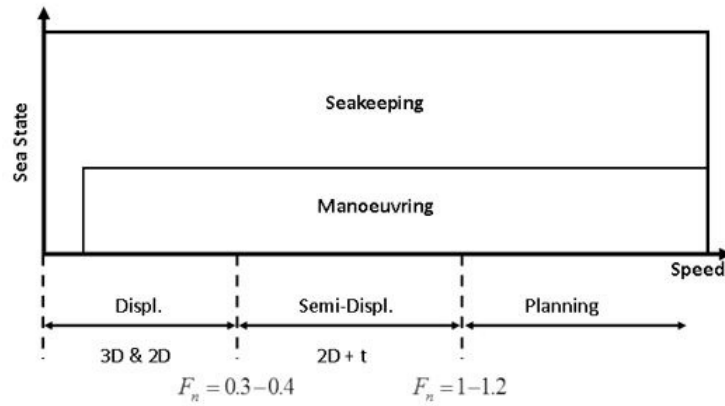


Figura 3.3: Clasificación según número de Froude [18]

Donde:

- Embarcaciones de desplazamiento ($F_n < 0,3 - 0,4$), donde domina la fuerza de flotación (hidrostática).
- Embarcaciones de semi-desplazamiento ($0,4 - 0,5 < F_n < 1,0 - 1,2$), donde la fuerza de flotación no es dominante a máxima velocidad, aparecen términos hidrodinámicos.
- Planning vessels ($F_n > 1,0 - 1,2$), adicional a los términos hidrodinámicos, aparecen términos de aerodinámica.

En nuestro caso la ecuación 3.9 es:

$$F_n = \frac{1,2 \frac{m}{s}}{\sqrt{(9,8 \frac{m}{s^2})(1,2m)}} = 0,35 \quad (3.10)$$

Si además decimos que la embarcación funcionará en aguas calmas, interiores; es posible que un modelo de maniobrabilidad sea suficiente para que la embarcación cumpla

con su misión, notamos que es este caso, la clasificación del tipo de embarcación según la velocidad máxima ($1,2\frac{m}{s}$) apenas cumple con el valor para ser tomada como de semi-desplazamiento, en este punto los componentes hidrodinámicos comienzan a tener efecto en el modelo.

3.3.2. El Modelamiento Cinemático y Dinámico

Para describir la posición y orientación de una embarcación con respecto a la tierra, es necesario definir dos sistemas de coordenadas, figura 3.4, uno fijo en tierra y uno fijo al vehículo. En el estudio de la maniobrabilidad de embarcaciones usualmente se usan los sistemas de coordenadas: $\{n\}$ o North-East-Down, este es el sistema fijo en tierra y $\{b\}$, fijo al cuerpo cuyo origen usualmente coincide con el Centro de Gravedad (CG) si este está situado en el plano principal de simetría y si no hay condiciones de carga que lo muevan, también se suele colocar paralelo a los ejes principales de inercia ya que reduce la complejidad de las ecuaciones.

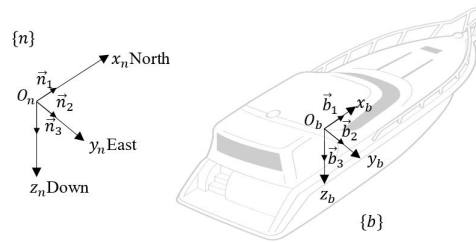


Figura 3.4: Sistemas de coordenadas de referencia

Dinámicamente una embarcación describe movimientos en seis grados de libertad, tres coordenadas que corresponden a los movimientos de traslación y las otras tres a

Cuadro 3.1: Nomenclatura para movimiento de vehículos marinos

DOF	Fuerza/ Momentos	Velocidad lineal/ angular	Posición/ Ángulos de Euler	
Traslación				
1	Surge	X	u	x
2	sway	Y	v	y
3	heave	Z	w	z
Rotación				
4	roll	K	p	ϕ
5	pitch	M	q	θ
6	yaw	N	r	ψ

los movimientos de rotación. En la tabla 3.1 y figura 3.3 se describe la nomenclatura comúnmente utilizada.

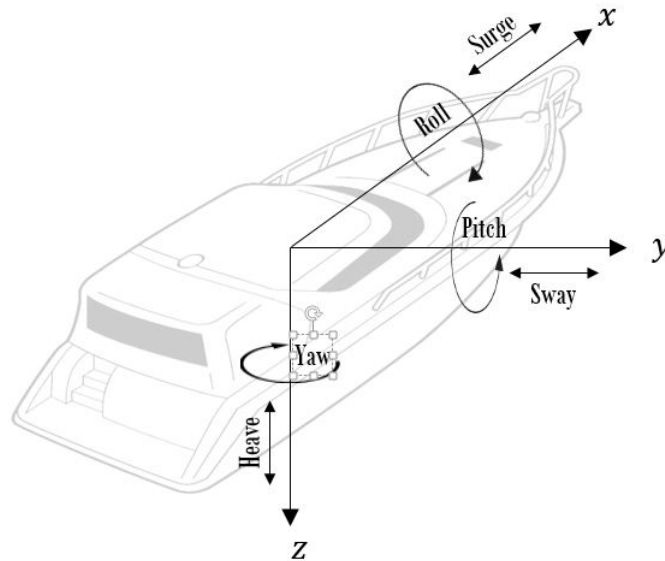


Figura 3.5: Nomenclatura para movimiento de vehículos marinos

Para iniciar con el modelamiento debemos a definir los vectores de posición r_{nb}^n (figura 3.6) y orientación Θ_{nb}^b del sistema de referencia fijo al cuerpo $\{b\}$ con respecto al

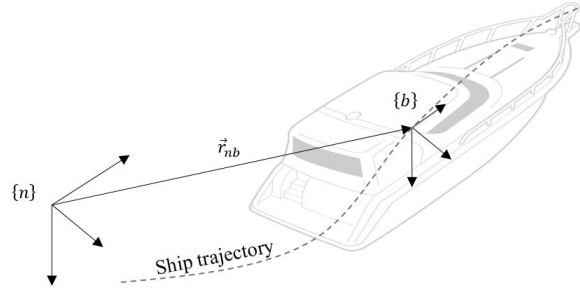


Figura 3.6: Vector de posición

sistema en tierra $\{n\}$ de la siguiente forma:

$$r_{nb}^n = [N, E, D]^t \quad (3.11)$$

$$\Theta_{nb} = [\phi, \theta, \psi]^t \quad (3.12)$$

También definimos los vectores de velocidad lineal v_{nb}^b y angular w_{nb}^b , pero esta vez con respecto al sistema de referencia fijo al cuerpo $\{b\}$, ya que usualmente la velocidad se da en términos de este sistema de referencia:

$$v_{nb}^b = [u, v, \omega]^t \quad (3.13)$$

$$w_{nb}^b = [p, q, r]^t \quad (3.14)$$

De 3.11 y 3.12 obtenemos el vector generalizado de posición η y de 3.13 y 3.14 obtenemos el vector generalizado de velocidad ν :

$$\eta = \begin{bmatrix} r_{nb}^n \\ \Theta_{nb} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$\nu = \begin{bmatrix} v_{nb}^b \\ w_{nb}^b \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Las ecuaciones del movimiento del vehículo se pueden expresar en la siguiente forma:

$$M_{RB} \dot{\nu} + C_{RB}(\nu) \nu = \tau_{RB} \quad (3.17)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta) \nu \quad (3.18)$$

Donde:

M_{RB} es la matriz de masas e inercia, tal que $M_{RB} = M_{RB}^T > 0$; $\dot{M}_{RB} = 0$, [18].

$C_{RB}(\nu)$ es la matriz de fuerzas centrípeta y de Coriolis que aparecen debido a que tenemos un sistema de referencia fijo en la embarcación rotando con respecto a un sistema fijo en tierra, la matriz $C_{RB}(\nu)$ es anti simétrica, $C_{RB}(\nu) = -C_{RB}(\nu)^T$ entonces, $x^T C x = 0$, lo que quiere decir que las fuerzas y momentos descritos en la matriz no realizan trabajo sobre el sistema [18].

τ_{RB} es un vector generalizado de las fuerzas y momentos externos que está compuesto por las fuerzas y momentos hidrodinámicos producidos por el movimiento del casco en el agua, las debidas a perturbaciones ambientales (olas, viento y corrientes), las debidas a las superficies de control (timones, aletas etc.) y por los sistemas de propulsión [17], entonces τ_{RB} toma la forma:

$$\tau_{RB} = \tau_H + \tau_{wind} + \tau_{current} + \tau_{control} \quad (3.19)$$

El movimiento de una embarcación puede incluir la mezcla de dos tipos de cargas hidrodinámicas, figura 3.7. Las cuales son: Cargas de excitación y cargas de radiación, las primeras se dan cuando el cuerpo está restringido al movimiento y la segunda cuando el cuerpo está forzado a moverse con la ola, debido a lo cual podemos escribir los componentes hidrodinámicos, τ_H así:

$$\tau_H = \tau_{Excitation} + \tau_{Radiation} \quad (3.20)$$

$$\tau_H = (F_m + F_{fk} + F_d) + (M_A \dot{\nu}_r + C_A(\nu_r) \nu_r + D(\nu_r) \nu_r) + g(\eta) \quad (3.21)$$

Donde:

F_m es el término de Morison.

F_{fk} es el término de Freude-Kriloff.

F_d son las fuerzas de difracción.

M_A es la matriz de masas e inercias añadidas.

$C_A(\nu)$ es el término de coriolis debido a la masa añadida en un sistema en rotación.

$D(\nu)$ es la matriz de damping.

$g(\eta)$ son las fuerzas de restauración.

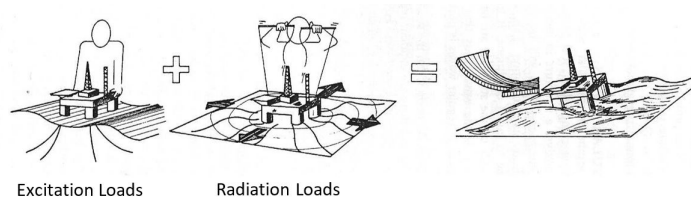


Figura 3.7: Tipos de cargas hidrodinámicas [15]

Las propiedades de cada término en la ecuación 3.21 pueden ser encontradas en [18].

No tendremos en cuenta $\tau_{Excitation} = F_m + F_{fk} + F_d$ debido a que la embarcación no tendrá restricciones de movimiento, tampoco tendremos en cuenta $\tau_{wind} + \tau_{current}$ ya que en la zona a operar son despreciables. Entonces la ecuación 3.17 adquiere la forma:

$$(M_{RB} + M_A) \dot{\nu} + (C_{RB}(\nu) + C_A(\nu)) \nu + D(\nu) \nu + g(\eta) = \tau_{control} \quad (3.22)$$

La matriz de masa del cuerpo rígido M_{RB} tiene esta forma:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_{3x3} & -mS(r_G) \\ mS(r_G) & I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$M_{RB} = M_{RB}^t > 0; \dot{M}_{RB} = 0 \quad (3.24)$$

La matriz de coriolis C_{RB} se puede calcular de la siguiente forma según el procedimiento empleado en [18]

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$C_{RB}(\nu) = \begin{bmatrix} 0_{3x3} & -S(M_{11}\nu_1 + M_{12}\nu_2) \\ -S(M_{11}\nu_1 + M_{12}\nu_2) & -S(M_{21}\nu_1 + M_{22}\nu_2) \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$C_{RB}(\nu) = -C_{RB}(\nu)^t \forall \nu \in \mathfrak{R}^6 \quad (3.27)$$

La matriz de masas añadidas M_A tiene la siguiente forma:

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

En condiciones reales, los 36 elementos de M_A pueden ser todos distintos, y $M_A = M_A^t > 0$ ha demostrado ser una buena aproximación, [17].

La matriz de coriolis debido a la masa añadida puede ser hallada análogamente a la ecuación 3.26:

$$M_A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$C_A(\nu) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(A_{11}\nu_1 + A_{12}\nu_2) \\ -S(A_{11}\nu_1 + A_{12}\nu_2) & -S(A_{21}\nu_1 + A_{22}\nu_2) \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

La matriz de amortiguamiento $D(\nu)$ (damping) tiene otros componentes:

$$D(\nu) = D_p(\nu) + D_s(\nu) + D_w(\nu) + D_M(\nu) \quad (3.31)$$

Donde:

$D_p(\nu)$ es el amortiguamiento potencial.

$D_s(\nu)$ es el amortiguamiento viscoso.

$D_w(\nu)$ es el wave drift damping.

$D_M(\nu)$ es el amortiguamiento debido al desprendimiento de vórtices.

- **Amortiguamiento potencial** ($D_p(\nu)$): La contribución de los términos de damping potencial en comparación con otros términos disipativos como el damping viscoso son por lo general insignificantes.
- **Amortiguamiento viscoso** ($D_s(\nu)$): La fricción superficial lineal debido a la teoría de la capa límite laminar y las variaciones de presión son importantes cuando se considera el movimiento de baja frecuencia. Por lo tanto, este efecto debe ser considerado al diseñar el sistema de control. Además de la fricción superficial, habrá una contribución de alta frecuencia debido a una capa límite turbulento (fricción superficial cuadrática o no lineal).
- **Wave Drift Damping** ($D_w(\nu)$): El amortiguamiento de la deriva de olas puede interpretarse como una resistencia añadida para los vasos de superficie que avanzan en ondas. Este tipo de amortiguación se deriva de la teoría de la onda de segundo orden. Es la contribución más importante de la amortiguación en los estados marinos más altos, esto es debido al hecho de que las fuerzas de deriva de olas son proporcionales al cuadrado de la altura de ola significativa H_s .
- **Amortiguamiento debido al desprendimiento de vórtices** ($D_M(\nu)$): La paradoja de D'Alambert establece que ninguna fuerza hidrodinámica actúa sobre un movimiento sólido completamente sumergido con velocidad constante en un fluido no viscoso. En un fluido viscoso, están presentes fuerzas de fricción

tales que el sistema no es conservador con respecto a la energía. Esto se conoce comúnmente como arrastre de interferencia. Surge debido al desprendimiento de láminas de vórtice en los bordes afilados.

Clásicamente, para hacer un estudio de maniobrabilidad se suele representar el movimiento de un buque en el plano horizontal y se utilizan modelos con tres grados de libertad en los que únicamente se consideran los movimientos de surge, sway y yaw. El resto de movimientos (Roll, Pitch y heave) se consideran despreciables. Las ecuaciones en forma algebraica son:

$$Surge : m (\dot{u} - \nu r - x_G r^2) = X \quad (3.32)$$

$$Sway : m (\dot{v} - ur + x_G \dot{r}) = Y \quad (3.33)$$

$$Yaw : I_z \dot{r} + mx_G (ur + \dot{v}) = N \quad (3.34)$$

Estas ecuaciones tienen no linealidades y actualmente existen varios enfoques para su desarrollo. Cada modelo difiere básicamente en la expresión de las fuerzas y momentos hidrodinámicas representados por X, Y y N; de los cuales se resumen los más importantes a continuación:

El Modelo de Abkowitz: En donde se propone tomar hasta el tercer orden del desarrollo en serie de Taylor de las funciones X, Y y N alrededor del estado de equilibrio

$u = u_0$ y $\nu = r = \dot{\nu} = \dot{r} = 0$ en la ecuación: $\tau_{RB}(u, \nu, r, \dot{u}, \dot{\nu}, \dot{r}, \delta)$, para más información consulte[3].

El Modelo de Norrbin [30] En donde se desarrolla una representación para la maniobra de buques en aguas profundas y restringidas.

El Modelo de Blanke [8] El cual es una forma simplificada del modelo de Norrbin manteniendo en el modelo sólo los coeficientes hidrodinámicos más importantes de forma que aún pueda servir para describir una importante variedad de regímenes de maniobra. Es una representación menos exacta que los dos modelos anteriores.

En cuanto al modelamiento lineal, se supone que el sway ν , el yaw r y el ángulo del timón δ son pequeños. Esto implica que, suponiendo que la velocidad del buque u_0 no varía y el empuje se mantiene constante. Los modelos lineales sólo se pueden utilizar para pequeñas desviaciones del punto de equilibrio $\nu = r = \delta = 0$. Sirven para describir adecuadamente el movimiento de un buque en una trayectoria recta. Sin embargo, si se desea estudiar las características de giro del buque, sólo pueden utilizarse en el intervalo lineal en buques con estabilidad direccional. Para poder aumentar el intervalo de validez de los modelos lineales, varios autores, proponen la adición de un término no lineal al modelo lineal.

En algunas representaciones de buques como por ejemplo buques de contenedores, de guerra o en los ferris de alta velocidad, además de los movimientos de surge, sway y yaw se debe incluir también el movimiento de roll [9], donde:

$$Surge : m (\dot{u} - \nu r - x_G r^2 + z_G p r) = X \quad (3.35)$$

$$Sway : m(\dot{\nu} - ur - z_G \dot{p} + x_G \dot{r}) = Y \quad (3.36)$$

$$Roll : I_x \dot{p} - m z_G (ur + \dot{\nu}) = K \quad (3.37)$$

$$Yaw : I_z \dot{r} + m x_G (ur + \dot{\nu}) = N \quad (3.38)$$

Es relativamente fácil calcular los términos M_{RB} , $C_{RB}(\nu)$, $g(\eta)$ y $\tau_{control}$, los cuales corresponden a los términos del lado izquierdo de los modelos simplificados para maniobrabilidad explicados anteriormente, pero los términos hidrodinámicos por el contrario resultan más difíciles de calcular, por lo tanto en la literatura y tal como hacen en [19] realizaremos algunas simplificaciones al modelo.

Los principales métodos para calcular los términos hidrodinámicos del modelo son:

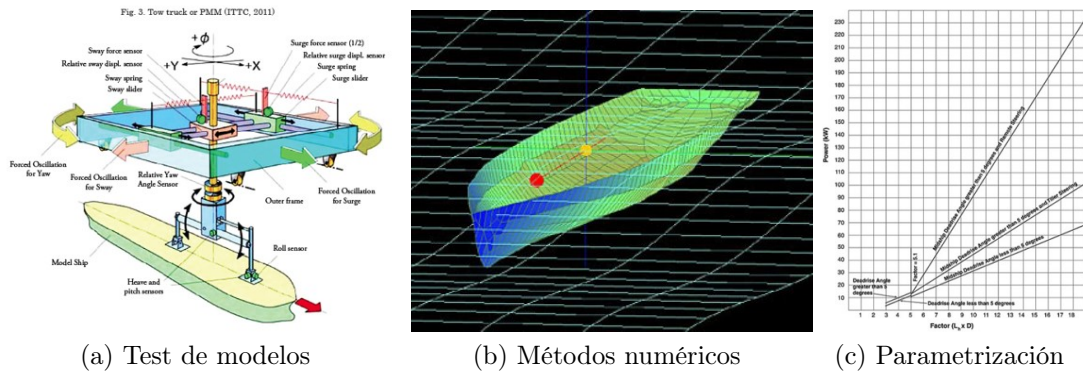


Figura 3.8: Métodos para obtener parámetros hidrodinámicos

1. El primero se basa test en estanques de pruebas usando mecanismos para controlar el movimiento de los “modelos” y sensores para detectar aceleraciones a

partir de velocidades impuestas al modelo o al agua y pos supuesto a las olas.

2. El segundo método se basa en cálculos numéricos, los cuales enmarcan otros métodos como la teoría de las tiras, la cual se usa para cuerpos lizos y presenta algunas limitaciones. Y la teoría potencial, que es la versión 3D del método anterior y es más completa.
3. Por último siempre se pueden hacer interpolaciones cuando se trata de escalar un casco.

Modelamiento del Sistema de Propulsión

La embarcación cuenta con un sistema de propela y timón. El empuje de la propela en aguas abiertas puede ser modelado de la siguiente forma, [17].

$$T = \rho D^4 K_T |n| n \quad (3.39)$$

Donde:

ρ es la densidad del agua.

K_T es el coeficiente de empuje no dimensional.

D es el diámetro de la propela.

n es la velocidad en RPM del eje de la propela.

En cuanto al timón, cuando este se acciona, aparte del momento que hace girar la embarcación, surge una resistencia al avance y una fuerza que causa desvío lateral de la embarcación. Hay varios métodos para calcular estas fuerzas, los cuales en su mayoría son experimentales y al igual que el modelamiento del resto de la embarcación,

representa un alto costo computacional, de tiempo y/o económico. Por eso usaremos el enfoque de [39], ya que el modelo solo está basado en algunos parámetros geométricos. Este enfoque se usa para calcular de forma aproximada las fuerzas presentes en el timón cuando la embarcación esta en ruta.

La fuerza normal presente en el timón tiene la forma:

$$F_N = K_{FN} \rho A_R V_R^2 \sin(\alpha_R) \quad (3.40)$$

Donde:

K_{FN} es la constante no dimensional del aspecto del timón.

A_R es el área del timón.

V_R es la velocidad del agua fluyendo al timón

α_R es el ángulo de ataque efectivo.

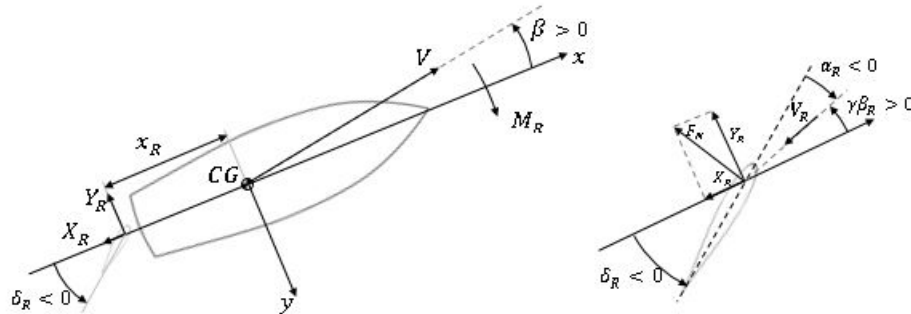


Figura 3.9: Fuerzas sobre el timón [39]

Entonces las fuerzas y momentos resultantes pueden ser descritos de la siguiente

forma:

$$\begin{aligned}
 X_R &= |F_N \sin(\delta_R)| \\
 Y_R &= a_y F_N \cos(\delta_R) \\
 M_R &= a_y x_R F_N \cos(\delta_R)
 \end{aligned}
 \tag{3.41}$$

Donde:

a_y es el coeficiente de influencia del casco sobre Y_R .

x_R es la distancia desde el centro de gravedad CG hasta el timón.

δ_R es el ángulo del timón desde la línea de crujía.

Por lo tanto las fuerzas $\tau_{control}$ tienen la siguiente forma:

$$\tau_{control} = \begin{bmatrix} T - X_R \\ Y_R \\ M_R \end{bmatrix}
 \tag{3.42}$$

3.3.3. El Control

Ley de Control

Los sistemas de control de movimiento para embarcaciones náuticas han sido un campo de investigación activo desde que el primer piloto automático mecánico fue construido por Elmer Sperry en 1911, véase [31]. Los sistemas de control modernos se basan en una variedad de técnicas de diseño tales como control PID, control óptimo cuadrático lineal y control estocástico, métodos de control H_∞ , sistemas difusos, redes neuronales y teoría de control no lineal, y muchos otros.

Teoría Fundamental de Lyapunov's

Dado un sistema de control, la primera y más importante pregunta sobre su comportamiento es sobre su estabilidad, ya que un sistema de control inestable no es útil. Cualitativamente, un sistema se describe como estable si se inicia el sistema en algún lugar cercano a un punto deseado de operación y este se mantiene cercano a ese punto.

Lyapunov en su trabajo de teoría de estabilidad presentó los métodos de linearización, el cual permite concluir sobre la estabilidad local de un sistema no lineal alrededor de un punto de equilibrio a partir de las propiedades de estabilidad de su aproximación lineal. También presentó el método directo, el cual no se restringe al caso local y permite determinar las propiedades de estabilidad de un sistema no lineal usando en una función escalar basada en energía y examinando la variación en el tiempo de la función.

Método Directo de Lyapunov's

Este método se basa en análisis de una observación fundamental de la física: Si la energía total del sistema es disipada continuamente, entonces el sistema eventualmente se establecerá en un punto de equilibrio.

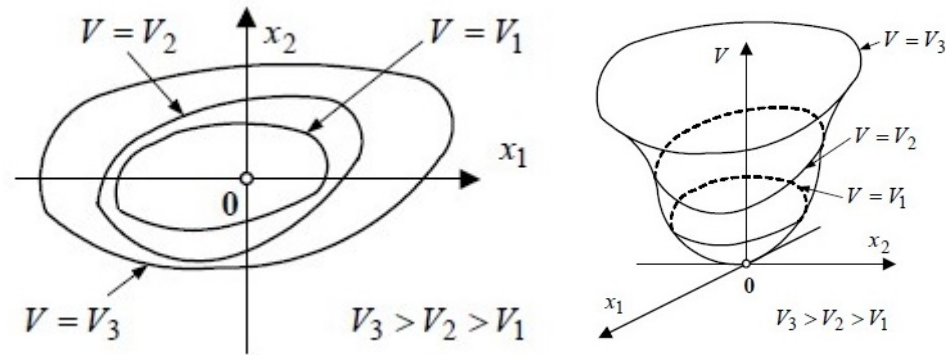
Hay ciertos aspectos que saltan a la vista mediante este análisis:

- Cero energía, corresponde a un punto de equilibrio ($x = 0, V = 0$).
- La estabilidad asintótica, implica la convergencia de la energía a cero.

- La inestabilidad, está relacionada con el crecimiento de la energía.

Si $V(x)$ es una función de energía, entonces $\dot{V}(x)$ es la variación de energía durante el movimiento del sistema.

Una función escalar continua $V(x)$ es definida positiva localmente si $V(0) = 0$ y $V(x) > 0, \forall x \neq 0$ en una esfera B_{R_0} .



(a) Interpretación de funciones definidas positivas con líneas de contorno (b) Típica forma de las funciones definidas positivas

Figura 3.10: Funciones definidas positivas [36]

Si en una esfera B_{R_0} , la función $V(x)$ es positiva definida y tiene derivadas parciales continuas, y si su derivada a lo largo de cualquier trayectoria de estado es negativa semi-definida, Ej: $\dot{V}(x) \leq 0$. Entonces $V(x)$ es una función de Lyapunov's del sistema $\dot{X} = f(x)$.

3.4. Ensayos con Modelos Libres

En la actualidad los métodos para analizar la maniobrabilidad de una embarcación se dividen en: ensayos con modelos cautivos o libres, análisis modulares y análisis

holísticos. Los ensayos con modelos buscan recrear el comportamiento de una embarcación a una escala menor, mientras que los análisis modulares y holísticos modelan matemáticamente la embarcación y simulan su comportamiento de forma modular (casco, superficies de control, propulsores, etc.) o holísticamente (como un todo). Los ensayos de modelos libres deben seguir las recomendaciones de The Manoeuvring Trial Code of ITTC[2] y the International Maritime Organization (IMO) circular MSC 1053 [27] en la cual se explican los principales pruebas para maniobrabilidad.

Las principales pruebas de mar son:

1. Maniobra de círculo de giro.
2. Maniobra de espiral
3. Maniobra de extracción.
4. Maniobra de zig zag.
5. Maniobra de parada
6. Hard rudder test.
7. Maniobra de hombre al agua (vuelta Williamson)

En este trabajo exploraremos algunas de estas.

3.4.1. Maniobra de Círculo de Giro

La maniobra de giro, tiene como objetivo obtener datos como: El diámetro táctico, estabilidad, pérdida de velocidad y rata de giro entre otras. Se inicia con un

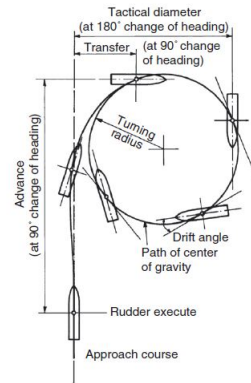


Figura 3.11: Prueba de círculo de giro [7]

movimiento rectilíneo uniforme, el timón se gira a máxima velocidad un ángulo δ (normalmente el máximo ángulo de timón) y se mantiene a este ángulo, hasta que el buque ha realizado un círculo de giro de al menos 540° .

El procedimiento de ejecución de la maniobra, establecido por la IMO es:

1. Se pone la embarcación en un rumbo y velocidad constantes conforme a la condición particular del acercamiento.
2. Comienza el registro de información.
3. Se gira el timón al ángulo máximo. El timón y los mandos de las máquinas se mantienen en posición constante durante la evolución.
4. La maniobra continúa hasta que se haya realizado un cambio de rumbo de 360° .
Sin embargo, se recomienda realizar un giro de 720° para evaluar plenamente los efectos del medio ambiente.
5. Se finaliza el registro de datos y se da por terminada la maniobra.

3.4.2. Maniobra de Zigzag

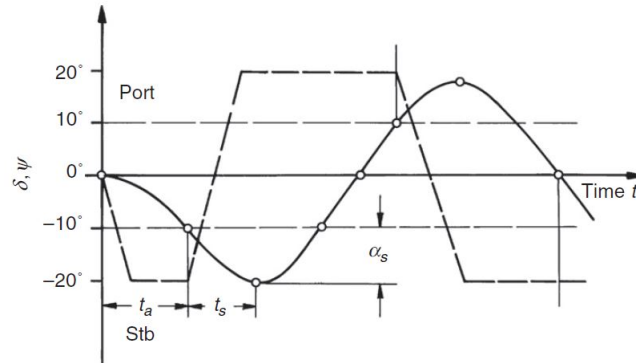


Figura 3.12: Prueba de zigzag [7]

Esta maniobra permite conocer la respuesta inicial de la embarcación al accionar del timón pero además ayuda a determinar la estabilidad de rumbo. El ángulo de giro del timón usualmente es de 10° pero este valor puede variar.

El procedimiento para realizar la prueba es el siguiente:

1. Se pone la embarcación en un rumbo y velocidad constantes conforme a la condición particular del acercamiento.
2. Comienza el registro de información.
3. El timón se gira ψ a estribor o a babor.
4. Cuando el rumbo se ha desviado 10° respecto del rumbo inicial, se gira el timón ψ en sentido contrario.
5. Cuando el rumbo se ha desviado -10° del rumbo inicial, se invierte el ángulo del timón nuevamente.

6. Este procedimiento se repite hasta que el buque haya cruzado el rumbo inicial por lo menos dos veces.
7. Se finaliza el registro de datos y se da por terminada la maniobra.

3.4.3. Maniobra de Parada

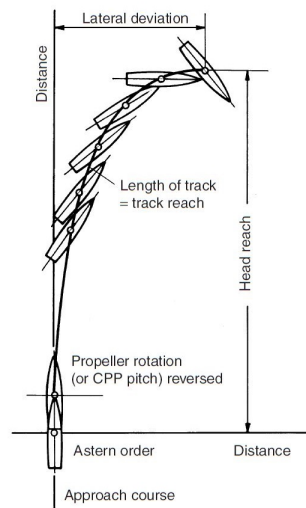


Figura 3.13: Prueba de parada [7]

La prueba de parada tiene como objetivo el cálculo de un estimado de la distancia mínima necesaria para detener la embarcación.

La maniobra finaliza cuando la embarcación se detiene completamente, como criterio de evaluación se establece que la distancia de frenado no deberá exceder 15 esloras.

Capítulo 4.

Desarrollo del Sistema

En este capítulo se mostrará el desarrollo y el alcance de cada uno de los objetivos. En la primera sección se abordará el modelamiento dinámico del sistema, el cual se realiza sobre un modelo simplificado de tres grados de libertad modificado a partir de [19]; también se muestran las pruebas de maniobrabilidad realizadas sobre el modelo dinámico previamente obtenido, con el fin de determinar las limitaciones de radios de giros y velocidades. La segunda sección muestra la selección de la ley de control y su aplicación, la cual está basada en los hallazgos en la literatura existente que dice que para el control de rumbo de una embarcación en aguas tranquilas es suficiente con un control PID[18]. La tercera sección muestra la preparación del sistema de navegación, es decir: calibración de sensores y la implantación del filtro extendido de kalman y por último, se incluye una sección de simulaciones donde se muestran resultados de estrategias basadas en enfoques de seguimiento de trayectoria y seguimiento de ruta.

4.1. El Modelo para Simulación

Se usará un modelo de maniobrabilidad de tres grados de libertad en surge, sway y yaw. El modelo empleado en las simulaciones fue tomado de [17]. En este modelo

se considera los valores de cuerpo rígido según las ecuaciones 3.32 to 3.34, y los parámetros de matriz de arrastre viscoso. Es decir, la matriz de masa, M_{RB} , tendrá la forma:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Siendo la masa del prototipo, m , igual a $8Kg$, y la inercia alrededor del eje z , I_z , igual a $2,67Kg/m^2$.

La matriz de corriollis, $C_{RB}(\nu)$, tendrá para un sistema de 3 DOF la forma,

$$C_{RB}(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -v \\ 0 & m & u \\ v & -u & 0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Finalmente, la matriz de arrastre viscoso, $D(\nu)$, se modelará según lo propuesto por [19]:

$$D(\nu) = \begin{bmatrix} \mu_u(u) & 0 & 0 \\ 0 & \mu_v(v) & 0 \\ 0 & 0 & \mu_r(r) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Donde:

$$\mu_u(u) = 6,5u + 2,2 \quad (4.4)$$

$$\mu_v(v) = 11,3v + 1,2 \quad (4.5)$$

$$\mu_r(r) = 1,2 \quad (4.6)$$

4.1.1. Simulaciones de Maniobrabilidad

Con el objetivo de asegurar que las rutas y/o trayectorias deseadas no contengan radios de curvatura y velocidades fuera de los rangos posibles, se hace una identificación de características de maniobrabilidad a través de los ensayos con modelos libres descritos en la subsección 3.4. La figura 4.1 muestra la trayectoria descrita por la embarcación en la simulación de la prueba de círculo de giro, estas pruebas se realizaron tomando como guía el código de [18].

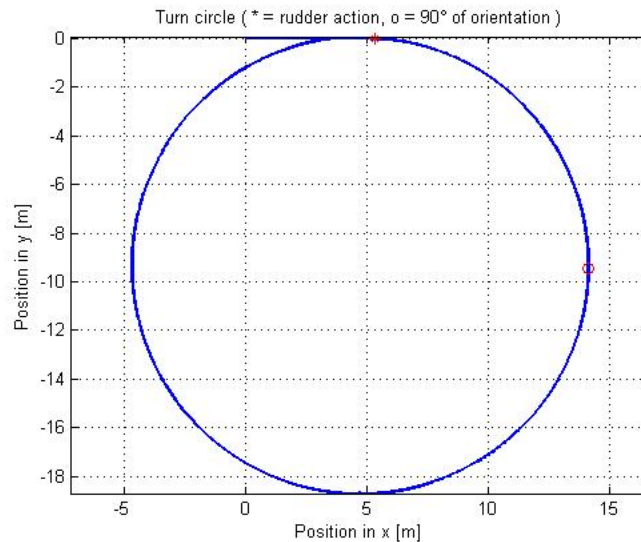


Figura 4.1: Prueba de círculo de giro

En la figura 4.1 se puede ver que el radio del círculo de giro es de $9m$, mientras que en la gráfica 4.2 observamos que para la configuración simulada la velocidad es de $1,0m/s$, la cual es menor al límite de $1,2m/s$ expuesto en la subsección 3.3.1.

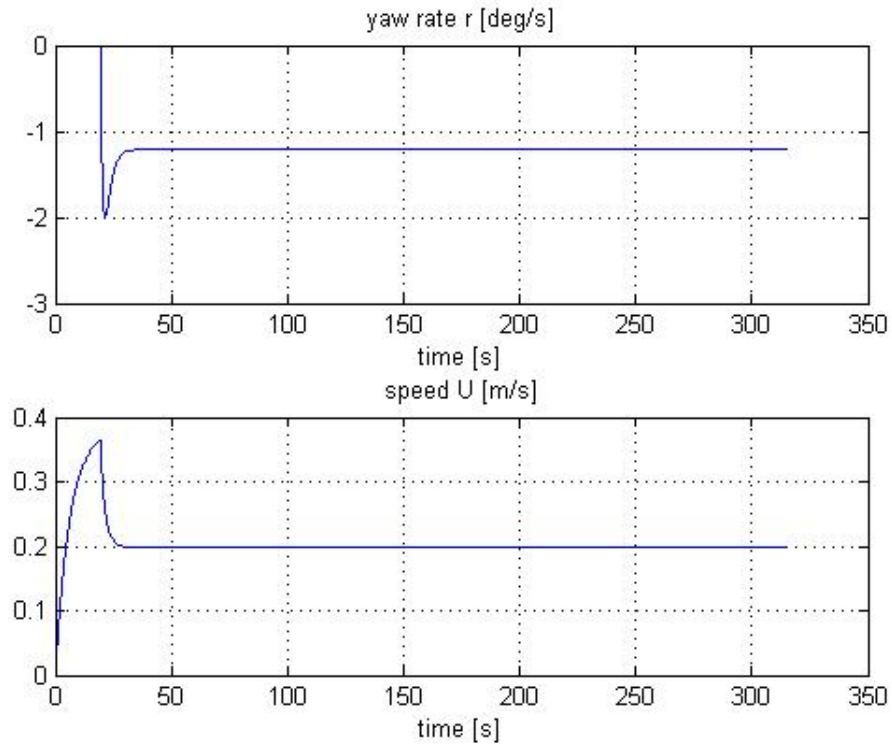


Figura 4.2: Prueba de círculo de giro, rata de giro y velocidad de avance

La tabla 4.1 muestra el resto de características obtenidas al finalizar la simulación de la prueba, las cuales pueden ser tomadas como referencia para trabajos futuros.

Cuadro 4.1: Resultados de maniobra de círculo de giro

Característica	[m]
Rudder execute (x-coordinate)	5
Steady turning radius	9
Maximum transfer	19
Maximum advance	9
Transfer at 90 (deg) heading	9
Advance at 90 (deg) heading	9
Tactical diameter at 180 (deg) heading	19

Para verificar que el modelo del barco no tiene algún comportamiento extraño se

verifica el ángulo entre la tangente a la curva y la orientación del barco, figura 4.3.

Los resultados se ilustran en la figura 4.4. Los cuales muestran que el modelo se comporta bien, el barco avanza de frente, no de lado.

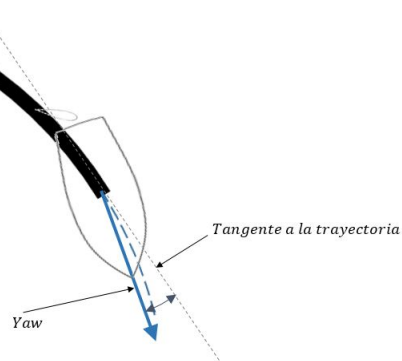


Figura 4.3: Yaw vs tangente

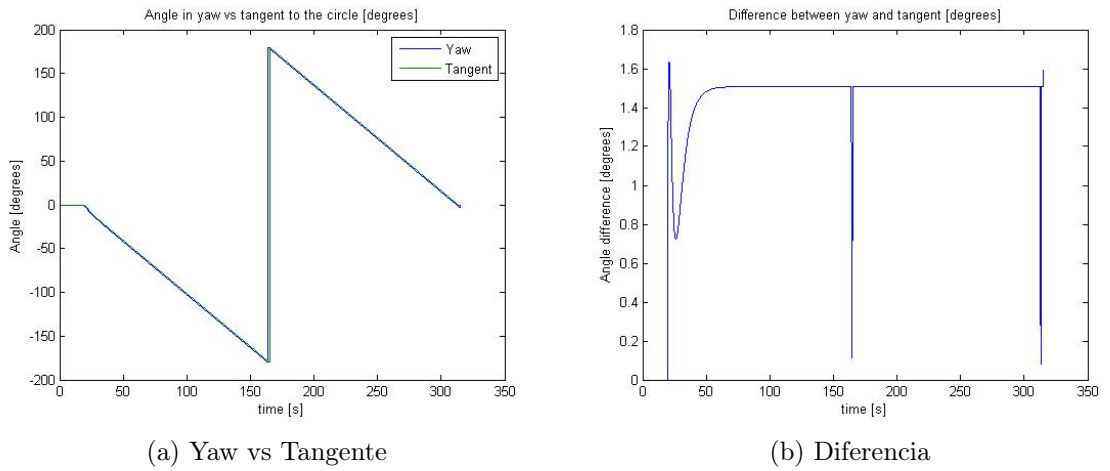


Figura 4.4: Ángulo en yaw vs la tangente de la ruta

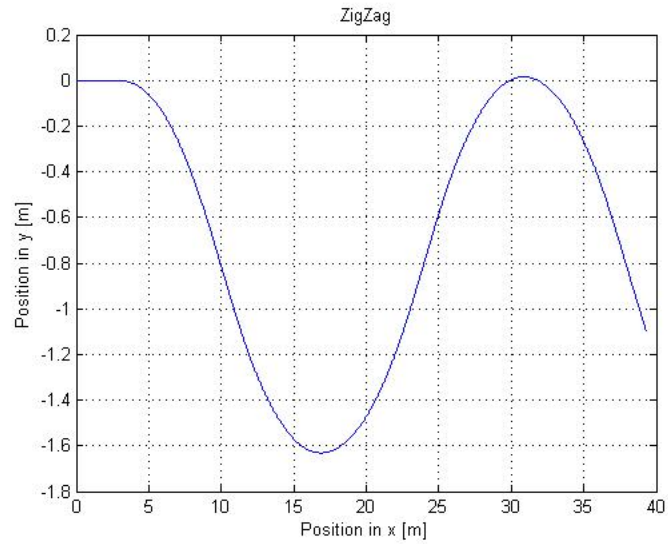


Figura 4.5: Prueba de Zig Zag

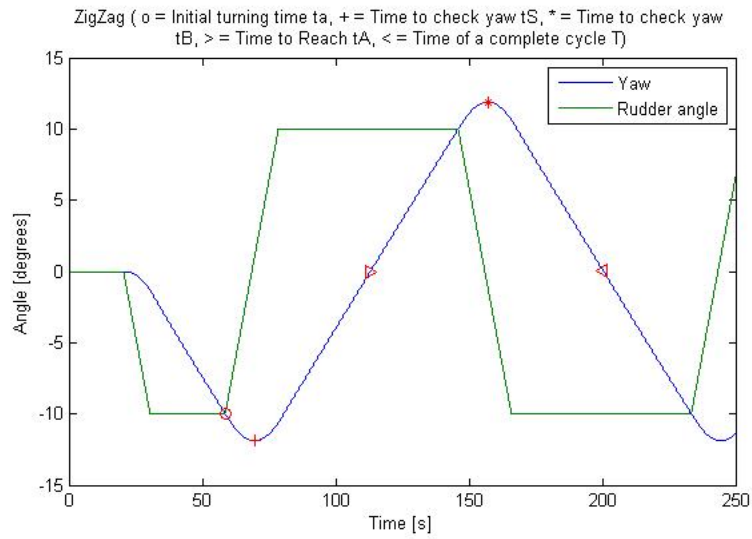


Figura 4.6: Prueba de Zig Zag Rudder angle vs Yaw

Cuadro 4.2: Resultados de maniobra de Zig Zag

Característica	valor
Initial turning time t_a	5.8 sec
Overshoot angle α	1.88 deg
Time to check yaw t_S	6.9 sec
Time to check yaw t_B	15.7 sec
Time to Reach t_A	11.20 sec
Time of a complete cycle T	20.0 sec
Angular speed $\dot{\psi}$	1.00 deg/sec

4.2. El Control de Rumbo

El objetivo del sistema de control es disminuir el error de orientación debido a que, por un lado, el sistema de guiado entrega una orientación deseada $\psi_d(t)$, y por el otro, la embarcación lleva su propia orientación $\psi(t)$. Considerando que el modelo dinámico del barco puede simularse con las siguientes ecuaciones:

$$\dot{\eta} = J_{\Theta}(\eta) \nu \quad (4.7)$$

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu = \tau \quad (4.8)$$

Si se define la ley de control por la ecuación:

$$\tau = -K J_{\Theta}^T \tilde{\psi} \quad (4.9)$$

donde:

$$\tilde{\psi} = \psi_d - \psi \quad (4.10)$$

En lazo cerrado el modelo se convierte en:

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu = -J_{\Theta}^T(\eta)K\tilde{\eta} \quad (4.11)$$

En este caso J_{Θ} es la matriz identidad porque los ejes z del sistema de referencia fijo al vehículo y el sistema de referencia inercial n son coincidentes, además de que no hay rotación con respecto a los otros ejes. Siendo $J_{\Theta} = I$, la ecuación 4.11 se reescribirá:

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu = -K\tilde{\eta} \quad (4.12)$$

Seleccionando como función candidata de Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2}\nu^T M\nu + \frac{1}{2}\tilde{\eta}^T K\tilde{\eta} \quad (4.13)$$

La cual se deriva para obtener:

$$\dot{V} = (M\dot{\nu} + J_{\Theta}^T K\tilde{\eta})\nu^T \quad (4.14)$$

Reemplazando 4.12 en 4.14:

$$\dot{V} = \nu^T (-[C(\nu) + D(\nu)]\nu) \quad (4.15)$$

Teniendo en cuenta que $\nu^T C(\nu)\nu = 0$. Entonces 4.15 se reescribe así:

$$\dot{V} = -\nu^T D(\nu)\nu \quad (4.16)$$

Debido a que V es definida positiva y \dot{V} es semi-definida negativa, se puede demostrar que el sistema 4.7 y 4.8 usando la ley de control 4.9 es asintóticamente estable.

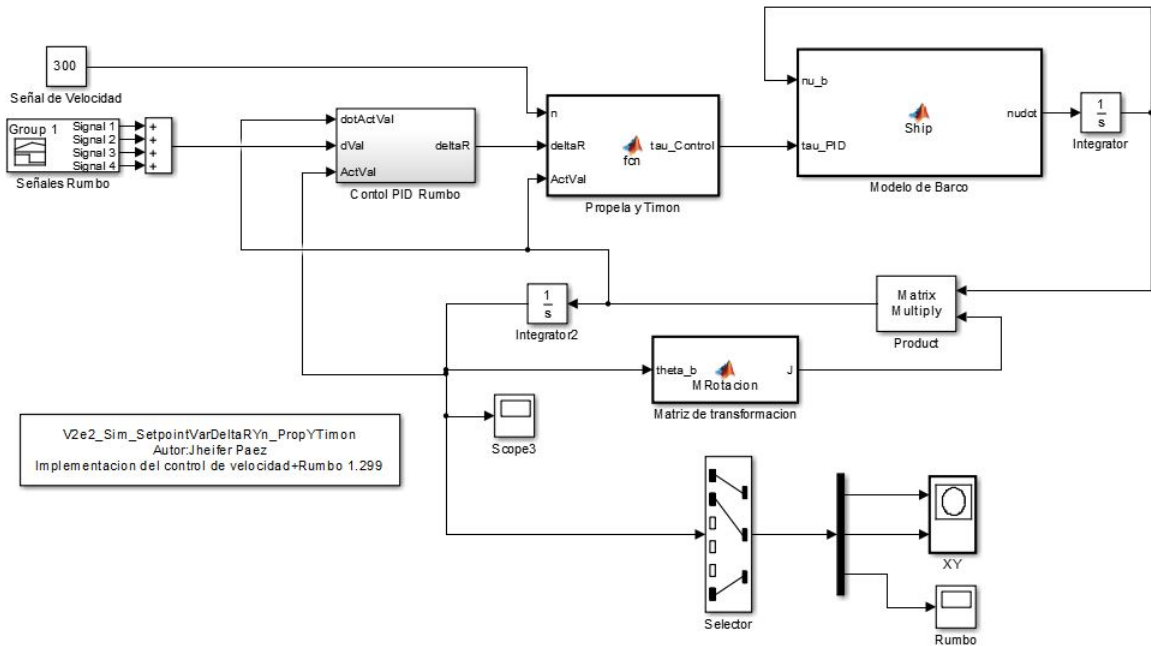


Figura 4.7: Modelo de simulink para calibración de constante para control de rumbo

Con la ley de control anterior y el modelo dinámico, se implementa un modelo en simulink para ajustar las variables del controlador, en la figura 4.7 se muestra el modelo de simulink, los bloques usados son los siguientes:

- Control PID rumbo: Bloque con implementación de un PID
- Propela y timón: Modelo del sistema de propulsión.
- Modelo de barco: Matrices y modelo de barco.
- Matriz de transformación: implementación de la ecuación 3.18
- Señales de Rumbo: Rumbo deseado en radianes.
- Señal de Velocidad: Velocidad de giro de la propela en rpm

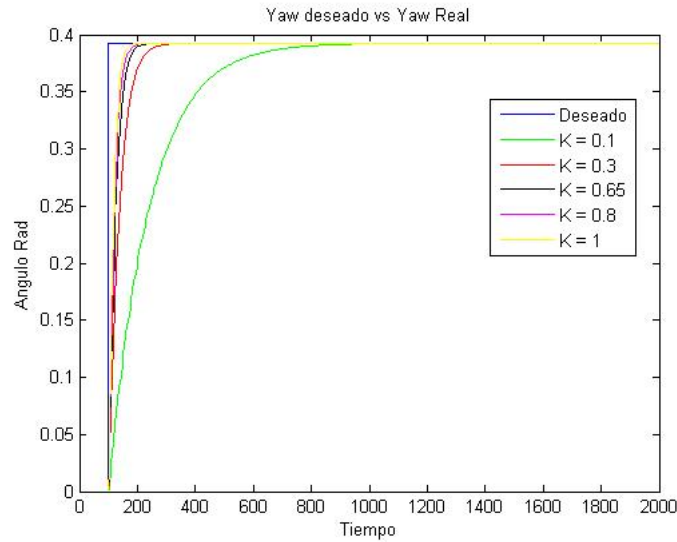


Figura 4.8: Yaw deseado VS Yaw real entrada paso

Una vez descritos en simulink, los bloques correspondientes al controlador y modelo dinámico del sistema, se procede a ajustar la ley de control, lo cual consiste en hallar el valor de K que cause el menor error de orientación. K afecta el ángulo del timón proporcionalmente al error de orientación, el timón tiene un limitador que coincide con los 40° para reproducir las limitaciones físicas en un barco real. Con la constante $K = 0,65$ se obtiene el mejor desempeño del sistema y en la gráfica 4.8 se puede observar el comportamiento para los distintos valores de K para una prueba inicial de una entrada tipo escalón.

Luego, se ejecuta una prueba de entrada rampa en la que observa nuevamente un buen comportamiento cuando $K = 0,65$. En la gráfica 4.9 se observan los resultados para diferentes valores de K .

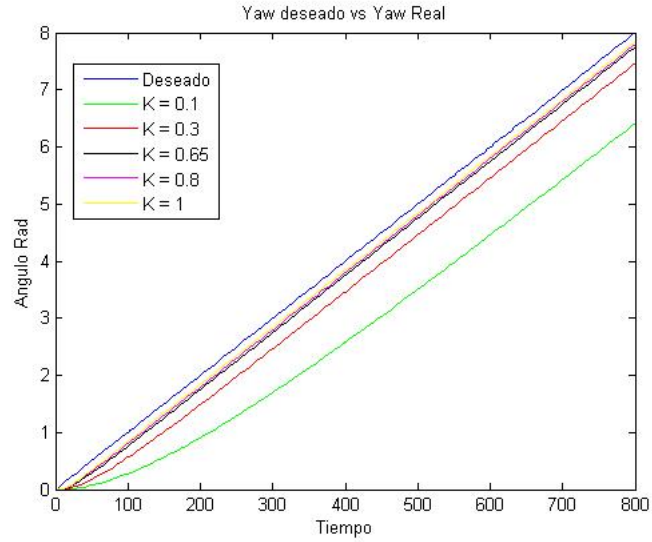


Figura 4.9: Yaw deseado VS Yaw real entrada rampa

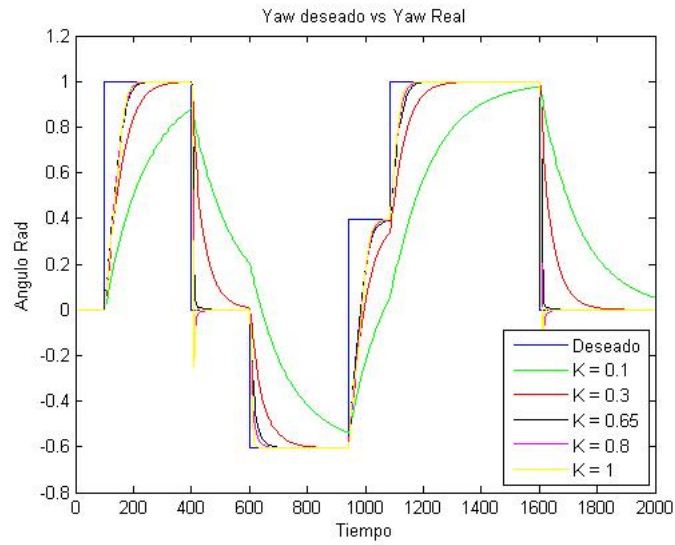


Figura 4.10: Yaw deseado VS Yaw real

Por último, se realiza una última prueba que consiste en múltiples entradas escalón con el objetivo de dificultar el seguimiento de los valores deseados, nuevamente $K = 0,65$ demuestra tener el mejor comportamiento. Los resultados se pueden ver en la gráfica

4.10.

4.3. Preparación del Sistema de Navegación

En la simulación, la salida del modelo dinámico es un vector con los valores de velocidades lineales y angulares de la embarcación, ver ecuación 3.16, esos valores son integrados para obtener posiciones y orientaciones, ecuación, 3.15. Pero en las pruebas del barco real, la orientación y posición del barco deben ser determinados mediante los sensores que hacen parte del sistema de navegación. Tanto la orientación, como la posición, son obtenidas a partir de la fusión de estos sensores, mediante el filtro extendido de kalman. Debido a las características de los sensores de la unidad inercial, primero es necesario realizar la calibración que se muestra a continuación.

4.3.1. Calibración de los Sensores

Se implementa la calibración de los sensores de la unidad inercial siguiendo el procedimiento referenciado en la subsección 3.1.1, el cual fue tomado de [13]. Este método consiste en llevar los datos a una esfera unitaria centrada en el origen.

$$1 = \hat{y}^{sT} \hat{y}^s = y_f^{sT} \Lambda^2 y_f^s + b^{sT} \Lambda^2 b^s - 2y_f^{sT} \Lambda^2 b^s \quad (4.17)$$

Donde:

y_f^s es la salida sin calibrar en el sistema de referencia del sensor.

\hat{y}^s es la salida calibrada.

$\Lambda = \text{diag} \{ \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \}$. Son los factores de escalado de cada uno de los ejes

$b^s = [b_1, b_2, b_3]^t$. Son los factores de bias de cada uno de los ejes.

Al introducir las variables intermedias:

$$d = 1 - b^{sT} \Lambda^2 b^s \quad (4.18)$$

$$\bar{\Lambda} = (1/d) \Lambda^2 = \text{diag} \{ \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \} \quad (4.19)$$

$$c = (1/d) \Lambda^2 b^s = \bar{\Lambda} b^s \quad (4.20)$$

La ecuación 4.17 se reescribe como:

$$1 = [y_{f1}^2 y_{f2}^2 y_{f3}^2 - 2y_{f1} - 2y_{f2} - 2y_{f3}] \begin{bmatrix} \bar{\lambda}_1 \\ \bar{\lambda}_2 \\ \bar{\lambda}_3 \\ c \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

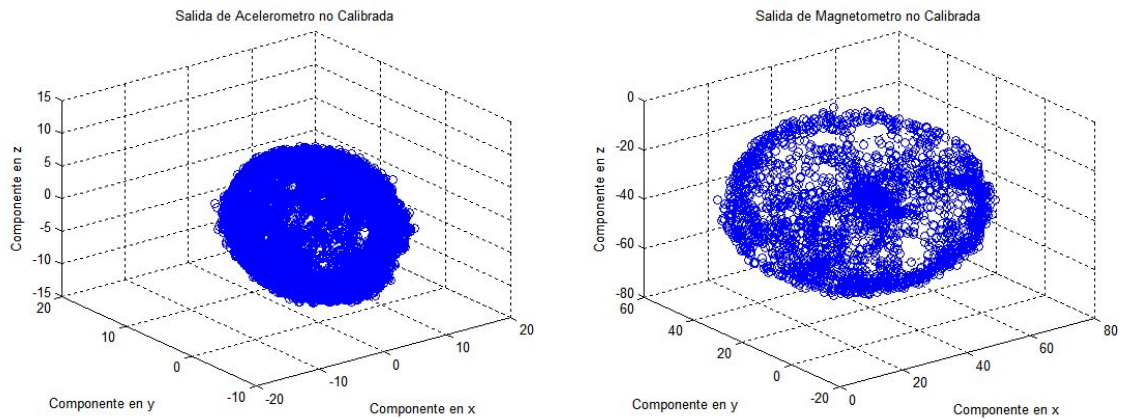
Entonces los valores de Λ y b^s pueden ser hallados así:

$$b^s = \frac{c}{\bar{\Lambda}} \quad (4.22)$$

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\bar{\Lambda}}{1 + \bar{\Lambda} b^{sT} b^s}} \quad (4.23)$$

Las salidas y^s pueden formar un elipsoide, lo cual quiere decir que los sensores no poseen la misma sensibilidad en los tres ejes. Por otro lado, las mediciones se normalizan y se hace coincidir la salida del acelerómetro con el eje z negativo del sistema fijo al cuerpo, mientras que la salidas x y y del magnetómetro se usan como referencia para

el eje y , ya que hay un componente en z del magnetómetro que no debe ser tenido en cuenta si se quiere que el eje y de la embarcación sea tangente a la superficie. Las figuras 4.11a y 4.11b muestran las salidas de los sensores sin calibrar.



(a) Salida y_a^s del acelerómetro sin calibrar (m/s^2) (b) Salida y_m^s de magnetómetro sin calibrar (uT)

Figura 4.11: Salida de sensores y^s sin calibrar

La calibración aparte de ajustar el centro del elipsoide al centro de coordenadas lo vuelve una esfera unitaria. Los resultados de la calibración se muestran en las figuras 4.12a y 4.12b.

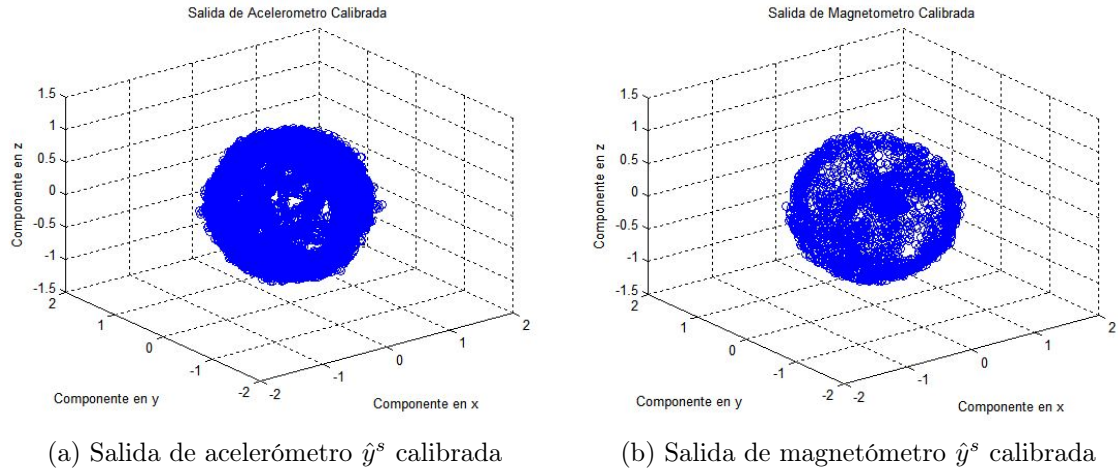


Figura 4.12: Salida de Sensores \hat{y}^s calibrada

Esta calibración debe ser realizada cada vez que se ejecute un nuevo experimento.

Como resultado tenemos:

$$\Lambda_{Acc} = \begin{bmatrix} 0,1016 \\ 0,1020 \\ 0,1009 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$b_{Acc}^s = \begin{bmatrix} -0,0962 \\ 0,3018 \\ -0,2985 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$\Lambda_{Mag} = \begin{bmatrix} 0,0312 \\ 0,0317 \\ 0,0321 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$b_{Mag}^s = \begin{bmatrix} 41,0607 \\ 26,6248 \\ -40,0774 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Este mismo procedimiento no se puede hacer con las salida y_g^s del giroscopio, para este sensor existen otras formas de calibración, las cuales no están en el alcance este

estudio.

4.3.2. El filtro Extendido de Kalman, Estimación de Orientación y Posición

En la subsección 3.1.2 se muestra la estructura del EKF clásico, pero existen varias formas de implementarlo para la estimación de orientación y posición de un cuerpo. En este caso se presenta la versión clásica descrita en [13] y [38], donde además se hace una revisión de otros trabajos con diferentes formas de implementar. Se demostrará que es suficiente para la misión un modelo de fusión de giroscopio, acelerómetro y magnetómetro para el cálculo de la orientación y acelerómetro más GPS para el cálculo de posición.

El vector de estado se define como:

$$x_k = \begin{bmatrix} x_{1k} \\ x_{2k} \\ x_{3k} \\ x_{4k} \\ x_{5k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_k \\ \omega_k \\ p_k \\ v_k \\ a_k \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Donde:

Q_k es el cuaternión unitario que describe la orientación del barco con respecto al sistema de referencia inercial.

ω_k es la velocidad angular del barco.

p_k es la posición x, y, z del barco.

v_k es la velocidad absoluta del barco.

a_k es la aceleración absoluta del barco.

La ecuación de predicción del estado 3.2 se convierte en:

$$\hat{x}_{k+1|k} = f(x_k) + w_k = \begin{bmatrix} x_{1k} + T_s E(x_{2k}) x_{1k} \\ x_{2k} \\ x_{3k} + T_s x_{4k} \\ x_{4k} + R_v^b(x_{1k}) T_s x_{6k} \\ x_{5k} \\ x_{6k} \end{bmatrix} + w_k \quad (4.29)$$

Donde:

T_s es el tiempo de muestreo.

w_k es el ruido del proceso.

$R_v^b(x_{1k})$ es la matriz de rotación del barco con respecto al sistema de referencia base.

$E(x_{2k}) x_{1k}$ es la relación entre la velocidad angular y la derivada con respecto al tiempo cuaternión descrita como:

$$E(x_{2k}) x_{1k} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -x_{2k}^T \\ x_{2k} & -S(x_{2k}) \end{bmatrix} x_{1k} \quad (4.30)$$

La ecuación $g(\hat{x}_{k+1|k})$, que aparece dentro de 3.7 que relaciona el vector de estado con las salidas de los sensores toma la forma:

$$g(\hat{x}_{k+1|k}) = \begin{bmatrix} x_{2k} \\ a^v(x_{1k}) \\ m^v(x_{1k}) \\ x_{3k} \\ x_{4k} \end{bmatrix} + v_k \quad (4.31)$$

Donde cada uno de los términos corresponde así:

x_{2k} es la estimación de la salida de giroscopio.

$a^v(x_{2k})$ es la estimación de la salida del acelerómetro, se tiene que $a^v(x_{2k}) = Q^* a^b Q$,

donde $a^b = [0, 0, -1]^T$, ya que vector de aceleración en el sistema base apunta en

sentido $-z$ (vertical al suelo).

$m^v(x_{2k})$ es la estimación de la salida del magnetómetro, $m(x_{2k}) = Q^*m^bQ$.

x_{3k} es la estimación de posición.

x_{4k} es la estimación de la salida del acelerómetro sin escalar.

v_k es ruido de la medición.

En la ecuación 3.7, la etapa de actualización del EKF, se usa y_k y $g(\hat{x}_{k+1/k})$ para corregir la posición estimada, entonces es de especial importancia asegurar que todos los sensores y_k se entreguen en el mismo sistema de referencia. En la figura 4.13 se muestran las transformaciones realizadas a la salida del acelerómetro y del magnetómetro para llevarlas al mismo sistema de referencia del giroscopio.

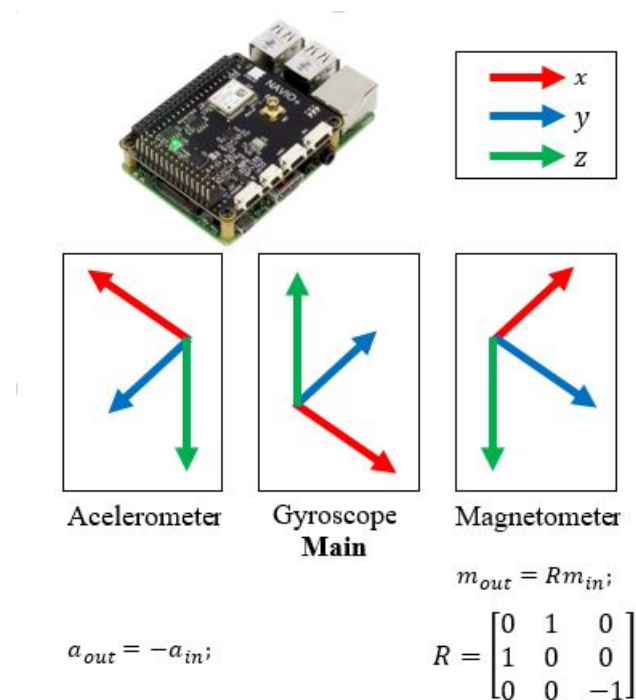
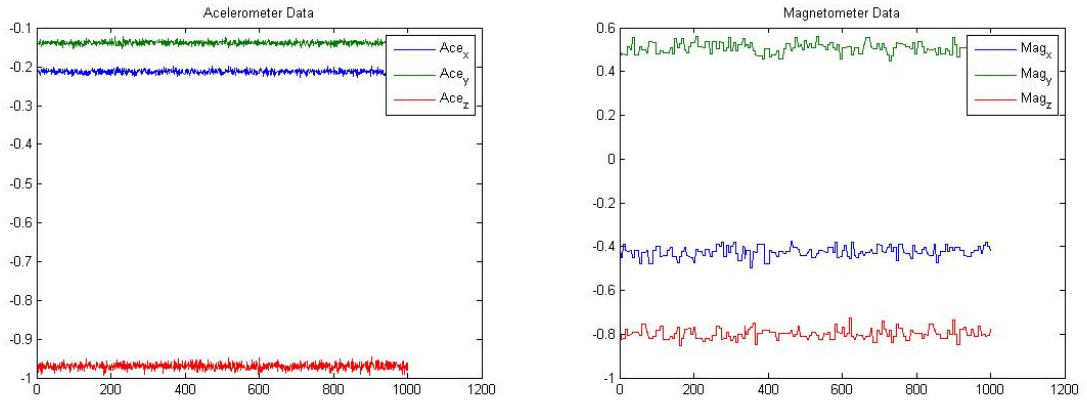


Figura 4.13: Diferencia entre sistemas de referencia de sensores de la IMU



(a) Salida de acelerómetro \hat{y}^s transformada (b) Salida de magnetómetro \hat{y}^s transformada

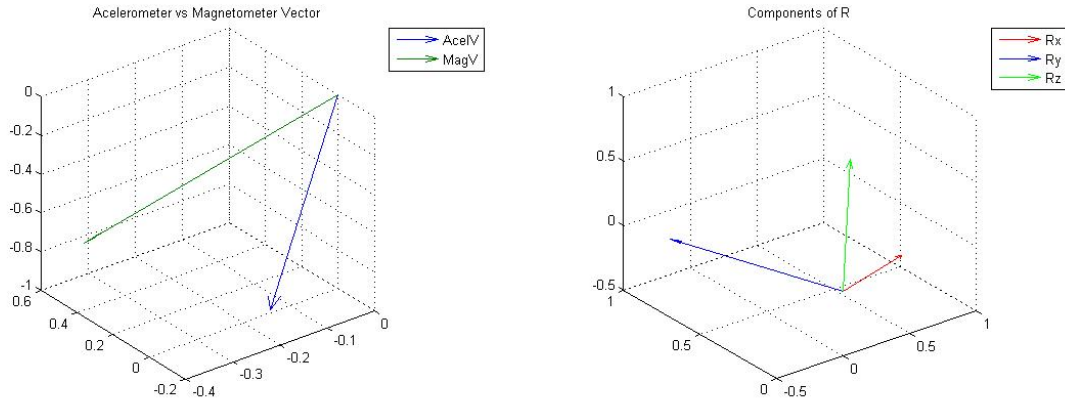
Figura 4.14: Salida de sensores \hat{y}^s transformadas

En la ecuación 4.31 sólo nos hace falta calcular m^b . Para hacerlo podemos hacer coincidir el sistema de referencia del barco con el sistema de referencia base y tomar los datos del acelerómetro y magnetómetro transformados mientras el sistema está estático, figuras 4.14 a y b. Cuando esto sucede, $a^b = R_v^b a^v = a^v = [0, 0, -1]^T$, lo que quiere decir que $R_v^b = I$ y que $-a^b$ coincide con el eje z del sistema de referencia base. Sin embargo m^b , el cual nos sirve como referencia para el eje y , está un poco más abajo, con valores en y y z . El procedimiento para hallar m^b desde cualquier posición estática se describe en [13] y nos arroja el siguiente resultado, el cual puede ser verificado haciendo coincidir los dos sistemas de coordenadas y midiendo el valor de m^v :

$$m^b = \begin{bmatrix} 0,0 \\ 0,8309 \\ -0,5549 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

La figura 4.15a muestra las salidas del acelerómetro y magnetómetro dibujadas como

vectores, el ángulo entre los dos vectores es de $56,26^\circ$. La figura 4.15 muestra el sistema de referencia base con respecto al sistema de referencia del barco, obtenido a partir de los valores de a^v y m^v .



(a) Promedio de salidas \hat{y}^s de acelerómetro y magnetómetro transformadas

(b) Componentes de R'

Figura 4.15: Relación entre las salidas \hat{y}^s de acelerómetro y magnetómetro transformadas y la orientación inicial del barco

La figura 4.16 muestra la implementación del filtro en simulink, se muestran cada una de las etapas: Predicción, con los bloques $\hat{x}_{k+1/k}$, $\hat{P}_{k+1/k}$ y F_k , este último hay que calcularlo al inicio; cálculo de ganancia de kalman, con K_{k+1} y G_k que también hay que calcularlo al inicio y Actualización, con los bloques $\hat{x}_{k+1/k+1}$ y $\hat{P}_{k+1/k+1}$. También se muestra un bloque para m^v , ya que es necesario re calcularlo si cambiamos de posición geográfica o si aparecen perturbaciones magnéticas en el lugar de las pruebas. Por ultimo, hacemos la conversión de cuaterniones a *rpy*.

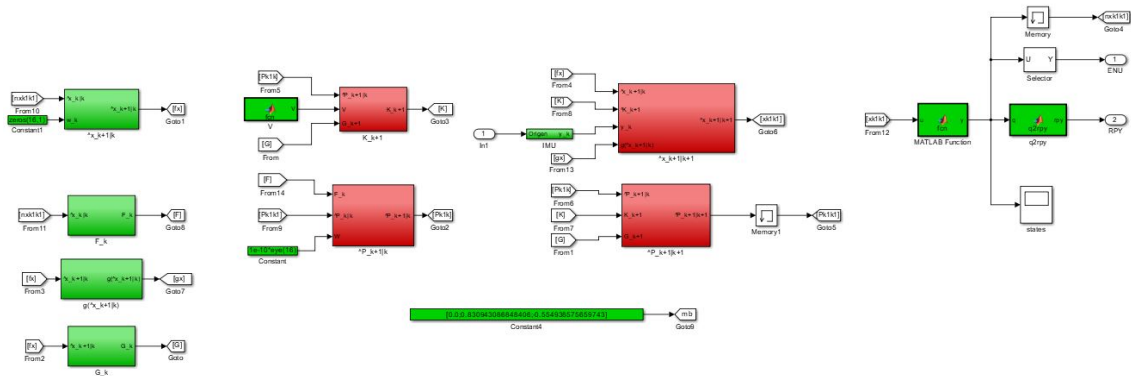


Figura 4.16: Modelo en simulink del EKF

4.4. Simulaciones

La simulación del barco inician con una trayectoria dada, las velocidades y radios de curvatura están dentro de los rangos deseados obtenidos en la subsección 3.4, los resultados que se muestran en la figura 4.17. En la imagen se ve claramente que el error de posición aumenta en los lugares de la ruta donde los radios de curvatura son menores al resto de la gráfica, Aunque los radios de curvatura son significativamente mayores a $9m$ y las velocidades son menores a las obtenidas en las verificaciones de la subsección 4.1.1.

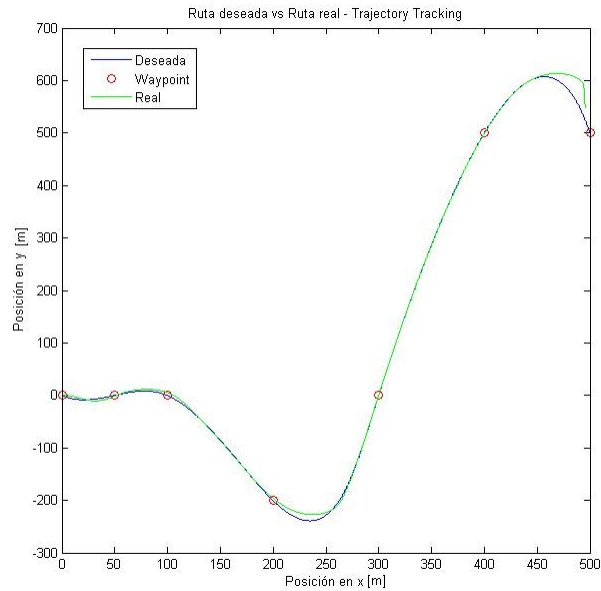


Figura 4.17: Ruta deseada VS Ruta real usando trajectory tracking

Aunque el sistema de guiado tiene en cuenta los radios de curvatura y velocidades calculados en la subsección 4.1.1, es evidente que en los tramos donde los radios de curvatura se hacen menores, el error de posición aumenta. En este punto se identificaron dos caminos para mejorar los resultados, el primero involucra continuar con las demás simulaciones de modelos libres, identificar cómo se comporta el modelo durante la desaceleración, incluir límites a las velocidades máximas y otras modificaciones; mientras que el segundo solo involucra implementar path following en lugar de trajectory tracking.

Las simulaciones se implementan usando el modelo simplificado de la embarcación, los bloques usados se muestran en la figura 4.18, y son los siguientes:

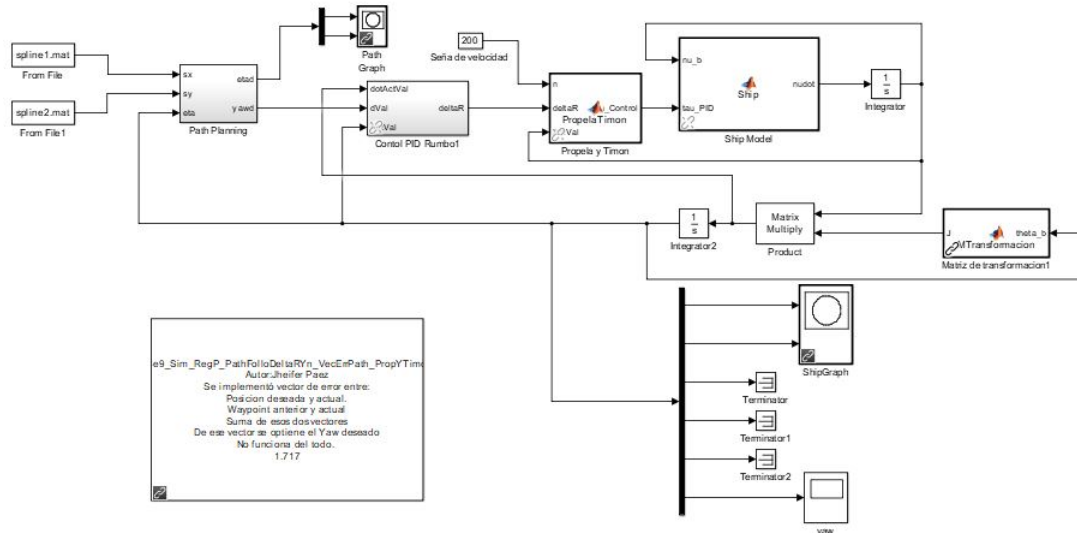


Figura 4.18: Modelo en simulink de path following para las simulaciones

- Path Planning: Bloque que lee la ruta deseada de los archivos spline 1 y 2 e implementa el path following.
- Control PID rumbo: Bloque con implementación de un PID
- Propela y timón: Modelo del sistema de propulsión.
- Modelo de barco: Matrices y modelo de barco.
- Matriz de transformación: implementación de la ecuación 3.18
- Señal de Velocidad: Velocidad de giro de la propela en rpm

La gráfica 4.19 muestra los resultados de implementar el path following, como se observa, el error de posición en los lugares con menor radio de curvatura se disminuyen considerablemente. Debido a la facilidad de conseguir estos resultados y debido a que

con el barco real se va a tratar con perturbaciones como el viento, corrientes acuáticas y a que no está claro hasta qué punto el modelo es válido; se decide continuar con el path following.

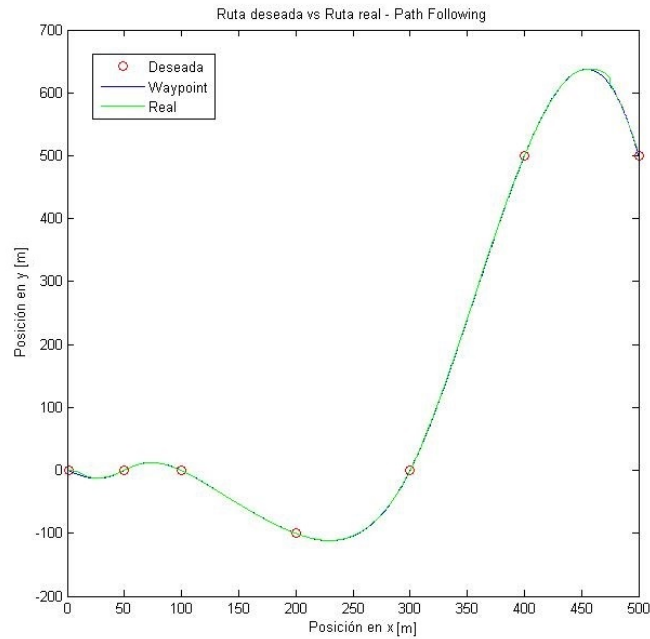


Figura 4.19: Ruta deseada VS Ruta real usando path following

Capítulo 5. Resultados y Discusión

Tomando como referencia otros trabajos realizados, se decide implementar una modificación al vector error de posición donde se incluye un vector tangente a la trayectoria, figura 5.1, el cual tiene modulo unitario y se multiplica por una ganancia con el valor deseado. Este cambio podría ser necesario para ayudar a disminuir un comportamiento sobre amortiguado cuando la embarcación sufra alguna perturbación, pierda el setpoint y lo intente recuperar.

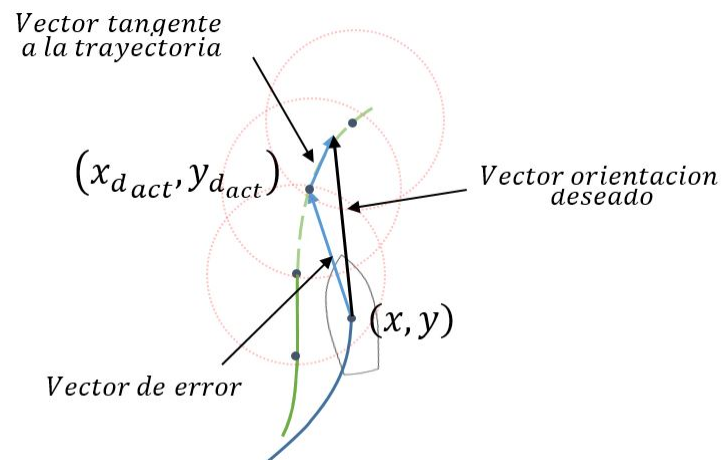


Figura 5.1: Implementación de vector tangente a la ruta [32]

En la figura 5.2 se muestra el modelo de simulink usado para las pruebas, en este modelo se reutilizan parte de los bloques de la simulación como es el caso de «Path

- Origen: Este bloque contiene las coordenadas del punto que el sistema debe considerar como la posición $x = 0$ y $y = 0$
- Ship: Este bloque se muestra en detalle en la figura 5.3 y contiene los bloques que se comunican la Raspberry en el barco.
- Speed RPM: Velocidad de giro de la propela en rpm

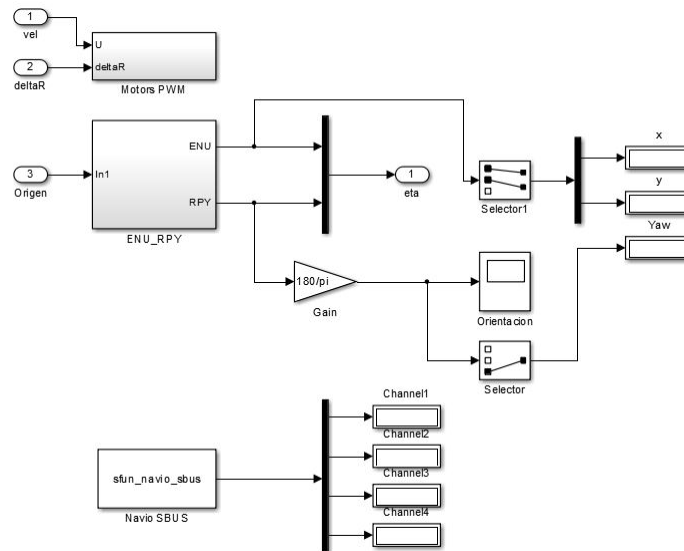


Figura 5.3: Detalle del bloque ship [32]

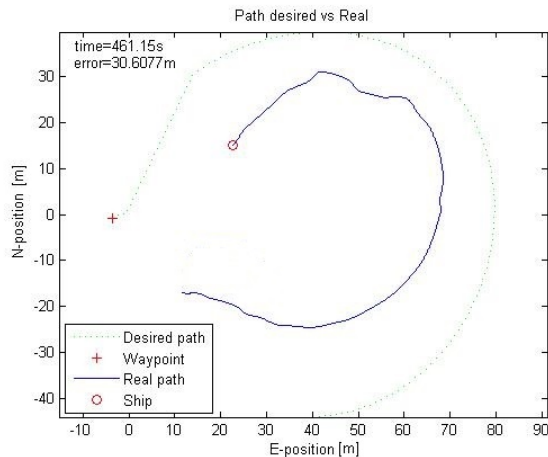
En la figura 5.3 se muestran los siguientes bloques:

- Motors PWM: Contiene dos s-functions que nos sirven para pasar un comando de porcentaje para controlar los motores de propulsión y los motores del timón, un valor de 50 % causa que los motores de propulsión no giren y que el timón se posiciona a un ángulo de 0° con respecto a la línea de crujía, un valor de 100 % causa que los motores de propulsión hagan girar las propelas de tal forma que

el barco avance hacia adelante y el timón gire completamente hacia la derecha, mientras que un valor de 0% causa que los motores de propulsión hagan que el barco retroceda y que el timón gire completamente hacia la izquierda.

- ENURPY: es el bloque que contiene la implementación del filtro de kalman para posición y orientación del barco.
- Navio SBUS: Es un bloque que nos permite registrar los comandos enviados por el control remoto; controlar el barco de forma manual antes, después de las pruebas y cuando el barco tiene curso de colisión.

La primera prueba registrada en este documento se hizo con un error permisible máximo de 30 m. Como se observa en las figuras 5.4 a y b, el barco realiza una ruta circular, el error se muestra en la figura 5.5.



(a) Animación de resultados



(b) Rutas sobre mapa

Figura 5.4: Resultados de prueba 1 de círculo

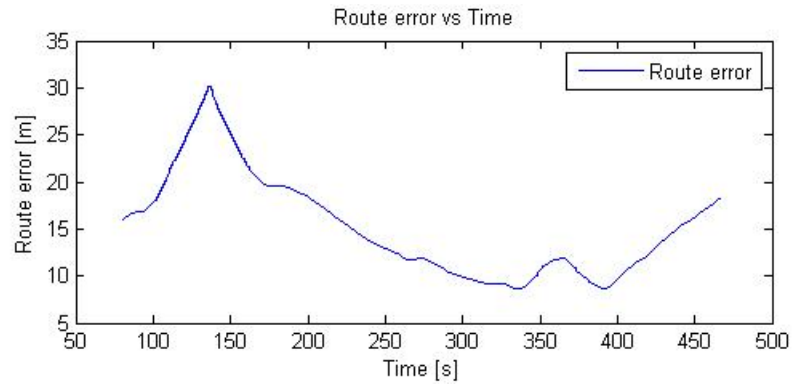
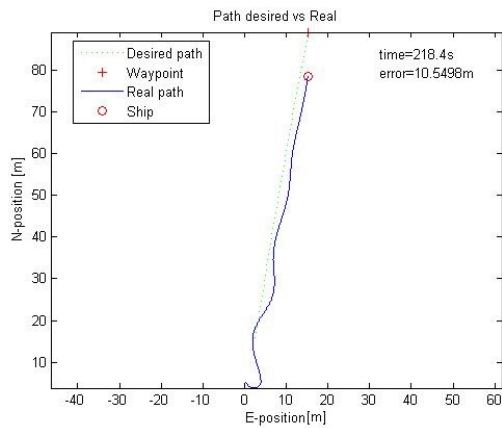


Figura 5.5: Error de posición para prueba 1 de circulo

La siguiente prueba consiste en una ruta en línea recta, la cual se muestra en las figuras 5.6 a y b y el error de posición se muestra en la figura 5.5 a partir de aquí el error permisible máximo bajó a 10 m.



(a) Animación de resultados



(b) Rutas sobre mapa

Figura 5.6: Resultados de prueba de línea recta

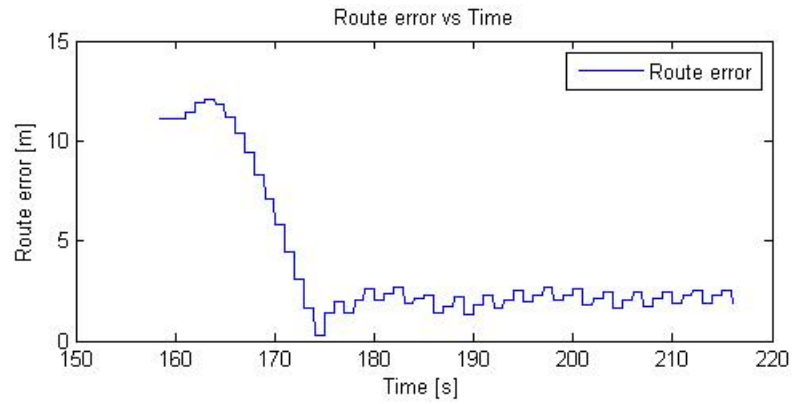
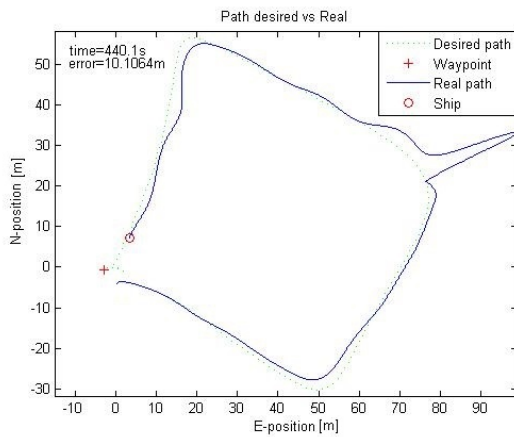


Figura 5.7: Error de posición para prueba de línea

Luego se realiza una prueba con una ruta en forma de rectángulo, en la figura 5.9 se muestra un momento en el que el error de posición sube a 23 metros, esto sucede cuando se pierde la conexión entre el computador ejecutando Matlab y la Raspberry; las rutas se observan en las figuras 5.8 a y b.



(a) Animación de resultados



(b) Rutas sobre mapa

Figura 5.8: Resultados de prueba de cuadrado

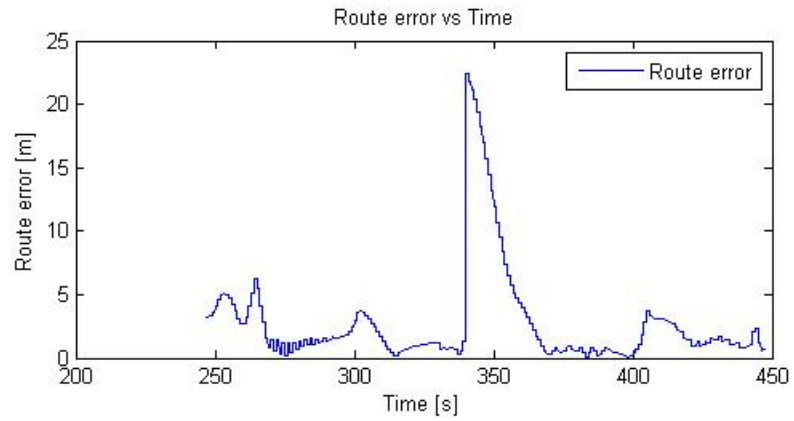
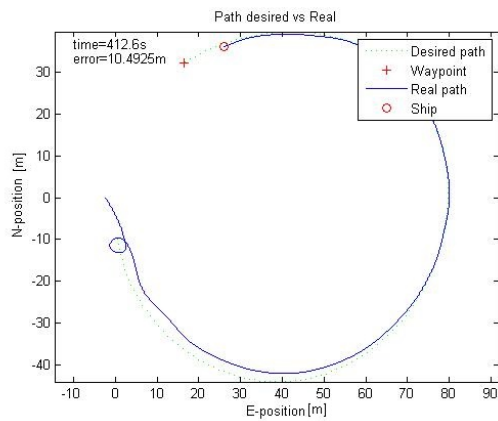


Figura 5.9: Error de posición para prueba de cuadrado

Los resultados de la última prueba con ruta en forma de círculo, figura 5.10 muestra mejores resultados que en la que se usó un error permisible máximo de 30 m, figura 5.4, la gráfica de error se muestra en la figura 5.11.



(a) Animación de Resultados



(b) Rutas sobre mapa

Figura 5.10: Resultados de prueba 2 de círculo [32]

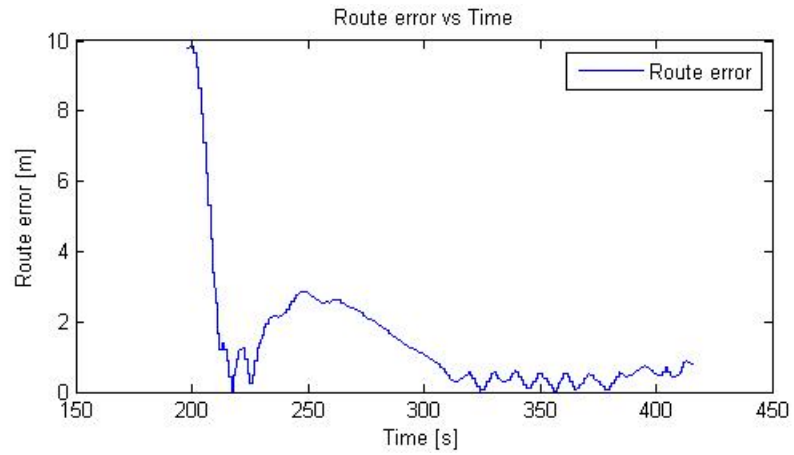


Figura 5.11: Error de posición para prueba 2 de circulo[32]

En la figura 5.12, se muestra el barco moviéndose en el lago, en el momento que se realiza una maniobra con el control remoto para posicionarlo en el punto donde se darán inicio a las pruebas.



Figura 5.12: USV en pruebas en el lago [32]

Capítulo 6.

Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros

En este estudio se logró modelar dinámicamente la embarcación a partir del modelo encontrado en [19], este es un aspecto en el que se puede profundizar en el futuro por medio de la dinámica de fluidos computacional o (Computational Fluid Dynamics, CFD, por sus siglas en inglés), lo cual permite diseñar y optimizar la forma del casco, propulsión y superficies de control sin necesidad de construir un prototipo. La ley de control de rumbo funcionó adecuadamente en las simulaciones y pruebas de campo en el lago, pero los trabajos futuros contemplan condiciones más difíciles, con vientos, corrientes y olas en la bahía de Cartagena o en el Canal del Dique.

Todo el sistema demuestra tener un comportamiento aceptable al definir la ruta offline y usar los algoritmos de estimación de orientación y posición basados en el filtro extendido de kalman y se encontró que el seguimiento de ruta es menos costoso computacionalmente que el seguimiento de trayectoria. En cuanto a estos aspectos, hay muchos problemas que se pueden abordar; como es el caso de la implementación de estrategias de guiado espacio-temporales para identificar los puntos de toma de muestras, implementación de sistemas de guiado que permitan ubicar la embarcación en entornos con mala recepción de señal GPS, pérdida de comunicación con la

*CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS*79

estación base, detección y evasión de obstáculos, entre otros. Por otro lado, para la implementación del monitoreo, se recomienda un mecanismo de ingreso de waypoint más sencillo y la adición de detección y evasión de obstáculos. Todo esto será posible en la etapa inmediatamente siguiente a este proyecto.

Bibliografía

- [1] Unmanned surface vehicle (USV) market by application (defense, scientific research, commercial, miscellaneous), size (small, medium, large, extra large), propulsion system, modes of operation, payload & geography - global forecast to 2022.
- [2] Full scale measurements manoeuvrability full scale manoeuvring trials procedure. *23th ITTC*, pages 1–18, 2002.
- [3] M. A. Abkowitz. *Lectures on ship hydrodynamics : steering and manoeuvrability*. Hydrodynamics Department, Lyngby, 1964.
- [4] A. Annamalai, R. Sutton, Chenguang Yang, P. Culverhouse, and S. Sharma. Innovative adaptive autopilot design for uninhabited surface vehicles. In *Irish Signals & Systems Conference 2014 and 2014 China-Ireland International Conference on Information and Communications Technologies (ISSC 2014/CIICT 2014)*. *25th IET*, pages 158–163, June 2013.
- [5] M. Arzamendia, I. Espartza, D. Reina, S. Toral, and D. Gregor. Comparison of eulerian and hamiltonian circuits for evolutionary-based path planning of an autonomous surface vehicle for monitoring ypacarai lake. pages 1–13.
- [6] A. Bennett, D. Barrett, V. Preston, J. Woo, S. Chandra, D. Diggins, R. Chapman, A. Wee, Z. Wang, M. Rush, and I. Kerr. Autonomous vehicles for remote sample collection: Enabling marine research. In *MTS/IEEE OCEANS 2015 - Genova: Discovering Sustainable Ocean Energy for a New World*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [7] V. Bertram. *Practical ship hydrodynamics*. Elsevier, 2012.
- [8] M. Blanke. *Ship Propulsion Losses Related to Automatic Steering and Prime Mover Control*. Technical University of Denmark, 1981.
- [9] M. Blanke and A. G. Jensen. Dynamic properties of a container vessel with low metacentric height. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 19(2):78–93, 1997.

- [10] S. Brizzolara, T. Curtin, M. Bovio, and G. Vernengo. Concept design and hydrodynamic optimization of an innovative SWATH USV by CFD methods. *Ocean Dynamics*, 62(2):227–237, Feb. 2012.
- [11] J. Brown, C. Tuggle, J. MacMahan, and A. Reniers. The use of autonomous vehicles for spatially measuring mean velocity profiles in rivers and estuaries. *Intel Serv Robotics*, 4(4):233–244, Oct. 2011.
- [12] S. Campbell, W. Naeem, and G. Irwin. A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres. *Annual Reviews in Control*, 36(2):267–283, Dec. 2012.
- [13] A. Cavallo, A. Cirillo, P. Cirillo, G. De Maria, P. Falco, C. Natale, and S. Pirozzi. Experimental comparison of sensor fusion algorithms for attitude estimation. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3):7585–7591, 2014.
- [14] S. Chen. Kalman filter for robot vision: a survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(11):4409–4420, 2012.
- [15] O. Faltinsen. *Sea loads on ships and offshore structures*, volume 1. Cambridge university press, 1993.
- [16] G. Ferri, A. Manzi, F. Fornai, F. Ciuchi, and C. Laschi. The HydroNet ASV, a small-sized autonomous catamaran for real-time monitoring of water quality: From design to missions at sea. 40(3):710–726.
- [17] T. Fossen. *Guidance and control of ocean vehicles*. Wiley, 1994.
- [18] T. Fossen. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Wiley, 2011.
- [19] F. J. P. Garcimartín. *Guiado, navegación y control de una flota de barcos autónomos*. 2011.
- [20] G. Hitz, A. Gotovos, F. Pomerleau, M.-E. Garneau, C. Pradalier, A. Krause, and R. Siegwart. Fully autonomous focused exploration for robotic environmental monitoring. In *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2658–2664. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [21] G. Hitz, F. Pomerleau, M.-E. Garneau, C. Pradalier, T. Posch, J. Pernthaler, and R. Siegwart. Autonomous inland water monitoring: Design and application of a surface vessel. 19(1):62–72.
- [22] R. Kannan. Orientation estimation based on LKF using differential state equation. *IEEE Sensors Journal*, 15(11):6156–6163, 2015.

- [23] H. Kim, D. Kim, J.-U. Shin, H. Kim, and H. Myung. Angular rate-constrained path planning algorithm for unmanned surface vehicles. *Ocean Engineering*, 84:37–44, July 2014.
- [24] M. Kristan, V. Sulic, S. Kovacic, and J. Pers. Fast image-based obstacle detection from unmanned surface vehicles. *CoRR*, abs/1503.01918, 2015.
- [25] T. Li, M. Xia, J. Chen, S. Gao, and C. De Silva. A hexagonal grid-based sampling planner for aquatic environmental monitoring using unmanned surface vehicles. In *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2017*, volume 2017-January, pages 3683–3688. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [26] K.-C. Ma, L. Liu, H. Heidarrson, and G. Sukhatme. Data-driven learning and planning for environmental sampling. 35(5):643–661.
- [27] I. MSC. Circ. 1053. *Explanatory notes to the standards for ship manoeuvrability*, 16, 2002.
- [28] R. Murphy, E. Steimle, M. Hall, M. Lindemuth, D. Trejo, S. Hurlebaus, Z. Medina-Cetina, and D. Slocum. Robot-Assisted Bridge Inspection. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 64(1):77–95, Oct. 2011.
- [29] W. Naeem, G. W. Irwin, and A. Yang. COLREGs-based collision avoidance strategies for unmanned surface vehicles. *Special Issue on Intelligent Mechatronics (LSMS2010 & ICSEE2010)*, 22(6):669–678, Sept. 2012.
- [30] N. H. Norrbin. Theory and observations on the use of a mathematical model for ship manoeuvring in deep and confined waters. Technical report, DTIC Document, 1971.
- [31] a. others. *GYROSCOPIC NAVIGATION APPARATUS*. June 1911.
- [32] J. Paez, J. L. Villa, J. Cabrera, and E. Yime. Implementation of an unmanned surface vehicle for environmental monitoring applications. In *2018 IEEE Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA)*, pages 1–5, Nov 2018.
- [33] E. Pinto, F. Marques, R. Mendonca, A. Lourenco, P. Santana, and J. Barata. An autonomous surface-aerial marsupial robotic team for riverine environmental monitoring: Benefiting from coordinated aerial, underwater, and surface level perception. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE ROBIO 2014*, pages 443–450. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

- [34] C. Sempere. *Tecnología de la defensa: análisis de la situación española*. Instituto Universitario General Gutiérrez Mellado, UNED, 2006.
- [35] Shaorong Xie, Peng Wu, Yan Peng, Jun Luo, Dong Qu, Qingmei Li, and J. Gu. The obstacle avoidance planning of USV based on improved artificial potential field. In *Information and Automation (ICIA), 2014 IEEE International Conference on*, pages 746–751, July 2014.
- [36] J.-J. E. Slotine, W. Li, et al. *Applied nonlinear control*, volume 199. Prentice hall Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [37] R.-j. Yan, S. Pang, H.-b. Sun, and Y.-j. Pang. Development and missions of unmanned surface vehicle. *J. Marine. Sci. Appl.*, 9(4):451–457, Dec. 2010.
- [38] Y. Yang, J. Zhou, and O. Loffeld. Quaternion-based kalman filtering on ins/gps. In *2012 15th International Conference on Information Fusion*, pages 511–518, July 2012.
- [39] K. Żelazny. Approximate method of calculating forces on rudder during ship sailing on a shipping route. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 8(3):459–464, 2014.