



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

Modelo dinámico y control de un catamarán  
robotizado.

Dynamic model and control of a robotized  
catamarán.

Autor/es

Álvaro Castillo Tapia

Director/es

José Luis Villarroel Salcedo

Titulación del autor

Ingeniería Electrónica y Automática

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2023



# Resumen

El problema que se plantea en este Trabajo de Fin de Grado es la obtención del modelo dinámico del RoboBoat (barco robotizado del Grupo de Robótica de la Universidad de Zaragoza).

Es necesario obtener el modelo de tracción de las hélices del RoboBoat con el fin de entender la correlación entre el voltaje de los motores y la fuerza que generada por estas.

Se diseñarán una serie de experimentos para identificar los diferentes parámetros del modelo. Este modelo se validará mediante diversos experimentos de navegación.

Desarrollaremos un simulador basado en el modelo dinámico obtenido con el que simularemos trayectorias deseadas para la validación de un controlador de bajo nivel. Este simulador facilitará posteriores desarrollos sobre RoboBoat.

Finalmente, se procede al diseño un controlador de bajo nivel con el objetivo de que el barco acepte órdenes de velocidad lineal y angular.

# Summary

The problem aims to solve in this Bachelor thesis is to obtain the dynamic model of RoboBoat (the robotic boat of the Robotics Group of the University of Zaragoza).

It is necessary to obtain the propeller thrust model of the RoboBoat in order to understand the correlation between the motor voltage and the force generated by them.

Several experiments will be designed to identify the different parameters of the model. This model will be validated using different navigation experiments.

We will develop a simulator based on the obtained dynamic model with which we will simulate desired trajectories for the validation of a low-level controller. This simulator will facilitate further developments on RoboBoat.

Finally, a low-level controller is designed to allow the ship to accept linear and angular velocity commands.

# Agradecimientos

Quiero comenzar dando las gracias a todas las personas que han estado a mi lado a lo largo de mi carrera con su apoyo, en especial a mis padres y a mi hermana.

También agradecer a mis profesores y mentores, gracias a José Luis Villarroel por la experiencia que me ha brindado en mi etapa universitaria. Gracias por compartir su conocimiento, por ser mi guía en este trabajo y por orientarme en el proceso de investigación.

A mis amigos y compañeros de universidad, les agradezco su colaboración y apoyo constante. Juntos hemos compartido muchos momentos que no se me van a olvidar nunca.

A todas las personas mencionadas y a aquellas que, por alguna razón, no lo están, les agradezco de corazón.

# Contenido

Resumen	
Summary	
Agradecimientos	
Contenido	
Índice de figuras	
Índice de tablas	
Acrónimos	

## Capítulo 1

Introducción.....	1
-------------------	---

## Capítulo 2

Descripción general del sistema RoboBoat.....	3
2.1. Descripción del casco y su electrónica.....	3
2.2. Esquema electrónico del barco.....	6

## Capítulo 3

Modelo de tracción RoboBoat.....	10
----------------------------------	----

## Capítulo 4

Identificación de modelo dinámico de RoboBoat.....	13
4.1. Marco de referencia.....	14
4.2. Método de identificación.....	15
4.3. Diseño modelo dinámico en Simulink.....	17
4.4. Herramientas usadas.....	19
4.5. Parámetros $d1, \alpha1$ / eje $x$ .....	20
4.6. Parámetros $d2, \alpha2$ / eje $y$ .....	22
4.7. Parámetros $d3, \alpha3$ / giro.....	24
4.8. Modelo identificado y validación.....	26

## **Capítulo 5**

Simulador basado en el modelo.....	30
------------------------------------	----

## **Capítulo 6**

Controlador a modo de validación .....	32
--	----

## **Capítulo 7**

Conclusiones y líneas futuras .....	45
-------------------------------------	----

<b>Bibliografía</b> .....	46
---------------------------	----

## **ANEXOS**

ANEXO A: Esquemático de bloques estructurales de la electrónica del RoboBoat..	47
--	----

ANEXO B: .....	49
----------------	----

ANEXO C.1: .....	51
------------------	----

ANEXO C.2: .....	54
------------------	----

# Índice de figuras

Ilustración 1: Casco del barco radiocontrol .....	4
Ilustración 2: Electrónica interior del barco .....	5
Ilustración 3: Control de bajo nivel RoboBoat: esquema modular .....	6
Ilustración 4: Señal PWM de 50Hz y ancho de pulso de 1 a 2 ms .....	7
Ilustración 5: Mando de control manual .....	8
Ilustración 6: Valores de fuerza de ambas hélices frente a voltaje del motor .....	12
Ilustración 7: Representación de las ecuaciones obtenidas para el modelo de tracción. 12	
Ilustración 8: Ejes de referencia .....	14
Ilustración 9: Modelo dinámico a partir de diagramas de bloques .....	17
Ilustración 10: Subsistema 1 del modelo dinámico .....	18
Ilustración 11: Subsistema 2 del modelo dinámico .....	18
Ilustración 12: Núcleo de la estación Base GPS .....	20
Ilustración 13: Cada hélice proporciona 0.7 Nw, por lo tanto, el par es nulo y la fuerza de tracción total es de 1.4 Nw. Al cabo de 15 segundos se alcanza el régimen permanente $v_x = 0.37$ m/s. ....	21
Ilustración 14: Ajuste por mínimos cuadrados de la función $d1 v_x \alpha1 = fp$ .....	22
Ilustración 15: Esquema del sistema de poleas empleado para la tracción lateral y fotografía del dispositivo .....	23
Ilustración 16: El barco es traccionado lateralmente con una fuerza de 9.319 Nw. $v_y$ alcanza su régimen permanente a los 5.5 s. ....	23
Ilustración 17: Ajuste por mínimos cuadrados de la función $d2 v_y \alpha2 = fy$ .....	24
Ilustración 18: El barco gira sobre sí mismo al aplicarle un par de 0.2816 Nwm. Se muestra la velocidad angular (en media 0.814 rad/s) del barco en régimen permanente durante varios giros. ....	25
Ilustración 19: Ajuste por mínimos cuadrados de la función $d3 w \alpha3 = Ts$ .....	26

Ilustración 20: Trayectoria circular del barco al aplicar 1.0 Nw en la hélice izquierda y 0.0 Nw en la derecha. (a) El diámetro real del círculo en régimen permanente es de 1.155m. (b) El diámetro obtenido mediante simulación con el modelo dinámico es tan solo de 0.34.....	27
Ilustración 21: La popa del barco presenta más resistencia al avance lateral que la proa .....	28
Ilustración 22: Trayectoria circular del barco al aplicar 1.0 Nw en la hélice izquierda y 0.0 Nw en la derecha en simulación con $d_s = 13.5$ . El diámetro obtenido es igual al real. ....	29
Ilustración 23: Visualización de la trayectoria del RoboBoat a partir del simulador.....	31
Ilustración 24: Sensor de velocidad del agua [8].....	35
Ilustración 25: Esquema de control con observador por realimentación [9].....	35
Ilustración 26: Trayectoria para comportamiento de velocidad baja .....	37
Ilustración 27: Velocidad en el eje X con un punto de equilibrio de 0.3132 m/s (Eje Y en décimas de segundos) .....	37
Ilustración 28: Trayectoria para comportamiento de velocidad alta .....	38
Ilustración 29: Velocidad en el eje X con un punto de equilibrio de 0.7385 m/s (Eje Y en décimas de segundos) .....	39
Ilustración 30: Trayectoria para comportamiento de giro suave .....	40
Ilustración 31: Velocidad en el eje X con un punto de equilibrio de 0.3177 m/s (Eje Y en décimas de segundos) .....	40
Ilustración 32: Velocidad en el eje Y con un punto de equilibrio de -0.0781 m/s (Eje Y en décimas de segundos) .....	41
Ilustración 33: Velocidad angular con un punto de equilibrio de 0.0411 rad/s (Eje Y en décimas de segundos).....	41
Ilustración 34: Trayectoria para comportamiento de giro brusco.....	42
Ilustración 35: Velocidad en el eje X con un punto de equilibrio de 0.3511 m/s (Eje Y en décimas de segundos) .....	43
Ilustración 36: Velocidad en el eje Y con un punto de equilibrio de -0.0865 m/s (Eje Y en décimas de segundos) .....	43
Ilustración 37: Velocidad angular con un punto de equilibrio de 0.0424 m/s (Eje Y en décimas de segundos).....	44

# Índice de tablas

Tabla 1: Régimen permanente de $v_x$ para diferentes $f_p$ .....	21
Tabla 2: Régimen permanente de $v_y$ para diferentes $f_y$ .....	23
Tabla 3: Régimen permanente de $w$ para varios $T_s$ (distancia entre hélices $B=0.256m$ ) .....	25
Tabla 4: Parámetros identificados de RoboBoat .....	26
Tabla 5: Valores hacia Adelante de la Hélice Derecha .....	49
Tabla 6: Valores hacia Adelante de la Hélice Izquierda .....	50
Tabla 7: Valores hacia Atrás de las dos Hélices.....	50

# Acrónimos

**RF** *Radio Frequency (Radiofrecuencia)*

**IMU** *Inertial Measurement Unit (Unidad de Medida Inercial)*

**LED** *Light Emitting Diode (Diodo emisor de luz)*

**VCC** *Voltaje de Corriente Continua*

**GND** *Ground (Tierra o Masa)*

**eCAP** *Enhanced Capture (Captura mejorada)*

**bps** *Bit por segundo*

**ESC** *Electronic Speed Controller (Regulador electrónico de velocidad)*

**PWM** *Pulse Width Modulation (Modulación por ancho de pulsos)*

**SCI** *Serial Communication Interface (Interfaz de Comunicación Serie)*

**GPS** *Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global)*

**USV** *Unmanned Surface Vehicles (Vehículos de Superficie No Tripulados)*

**RTK** *Real Time Kinematic (Navegación Cinética Satelital en Tiempo Real)*

# Capítulo 1

## Introducción

El grupo de Robótica, Percepción y Tiempo Real (RoPeRT) es uno de los grupos de investigación de la Universidad de Zaragoza que ha sido considerado Grupo de Investigación de Calidad por el Gobierno de Aragón. Su experiencia destaca en la robótica móvil y de manipulación, sistemas de percepción, visión por computadora, etc.

Este trabajo se enmarca en el proyecto ARDUA (Autonomous or semi-autonomous Robot Deployment for Underground Applications) que tiene como objetivo el desarrollo de sistemas robóticos para tareas de intervención de entornos confinados y desafiantes como túneles, minas o cuevas. [1]

Se parte del prototipo RoboBoat que es un barco robotizado de pequeñas dimensiones desarrollado en el proyecto ARDUA. Es fundamental realizar un proceso de documentación y de análisis de este prototipo para poder abordar posteriores mejoras. Tiene una navegación de bajo nivel en bucle abierto (sin retroalimentación del entorno o el estado actual), lo que compromete el control de su comportamiento dinámico [2].

El objetivo de este trabajo es la obtención del modelo dinámico del RoboBoat para su utilización en el diseño de controladores en bucle cerrado y el desarrollo de un simulador que facilite los citados diseños. Para lograr este objetivo, necesitamos realizar una serie de pruebas experimentales debido a la complejidad del comportamiento dinámico de los barcos y a la poca experiencia que se tiene en el grupo de Robótica de la Universidad de Zaragoza en este tipo de móviles.

A continuación, se describe la metodología utilizada junto con los principales pasos en el desarrollo de este TFG:

- En el Capítulo 2, se presenta una descripción detallada del prototipo RoboBoat en su estado original, así como la explicación de cada uno de sus módulos.
- En el Capítulo 3, con el fin de avanzar en cualquier desarrollo posterior, es imprescindible conocer el modelo de tracción del barco, que consiste en la relación entre la tensión aplicada a los motores y la fuerza generada por las hélices.
- En el Capítulo 4, mediante una serie de experimentos se recopilan los valores necesarios para integrar el modelo dinámico seleccionado en el RoboBoat.
- En el Capítulo 5, se ha desarrollado un simulador basado en el modelo en Matlab para calcular las velocidades del barco. Mediante el uso de la odometría visualizamos las trayectorias del barco.
- En el Capítulo 6, se implementa un controlador a modo de validación para los diferentes comportamientos establecidos para el RoboBoat, que incluyen velocidades lineales bajas, altas, giros suaves y giros bruscos.

## **Capítulo 2**

# **Descripción general del sistema RoboBoat**

En este capítulo se describe cada uno de los componentes que están presentes en el sistema RoboBoat, detallando cada uno de sus módulos por donde pasa la información entre ellos. Describiremos también las comunicaciones entre los módulos mencionados.

### **2.1. Descripción del casco y su electrónica**

RoboBoat es un barco catamarán con un hardware de navegación diseñado para la realización de pruebas y experimentos en lagos o cuevas. El diseño de dicha arquitectura y hardware no es parte del proyecto, pero la describimos con detalle por la repercusión que tiene en este trabajo.

El casco del RoboBoat es un barco de cebo comercial Carp Madness XXL y tiene unas dimensiones de 52 cm de largo, 40 cm de ancho y pesa 8.7 Kg con todo el conjunto hardware que lleva en el interior. Tiene una distancia entre las hélices de 25.6 cm y una profundidad sumergida de 10 cm. El casco es de plástico cubierto por una pequeña capa de fibra de carbono. (ver Ilustración 1)



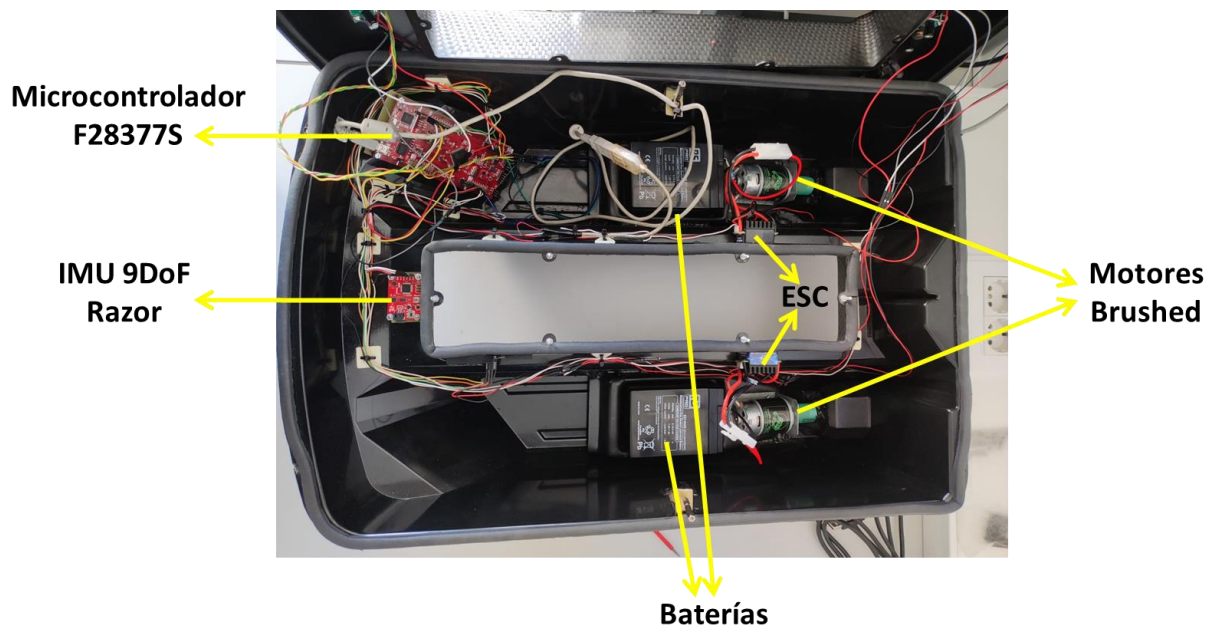
*Ilustración 1: Casco del barco radiocontrol*

Los componentes internos del RoboBoat y su función principal para la navegación del barco son las siguientes:

- 2 Motores mt-650 Brushed (Con escobillas) que garantizan un alto par y potencia, pero sin retroalimentación de velocidad.
- 2 Variadores de velocidad independientes para cada motor comandados por un PWM típico utilizado en radiocontrol.
- 2 Hélices con eje de doble rodamiento de bolas de alta velocidad que proporcionan la propulsión diferencial.
- Sistema de iluminación LED de alto brillo con marcos de acero inoxidable.
- 2 Baterías de gel de plomo con una tensión de 6V y un amperaje de 4.5 mAh.
- Un sistema de control basado en el microcontrolador Texas Instruments F28377S. Programado y desarrollado en el Grupo de Robótica.

- 1 IMU 9DoF Razor, el cual permite obtener mediciones de velocidades lineales, aceleraciones angulares, así como información sobre el balanceo, cabeceo y guiñada del casco.
- Un receptor de radiocontrol de seis canales.
- Una línea serie para comandos de control de alto nivel

En la Ilustración 2 se puede observar la electrónica interior comentada anteriormente que detalla el control de bajo nivel integrado. Identificamos los componentes principales: el LaunchPad de Texas Instruments, un IMU, las dos baterías, los dos motores y los dos variadores de velocidad (ESC).



*Ilustración 2: Electrónica interior del barco*

Se utilizan dos baterías que alimentan cada una a un motor, a un variador de velocidad, los LEDs y a las placas electrónicas.

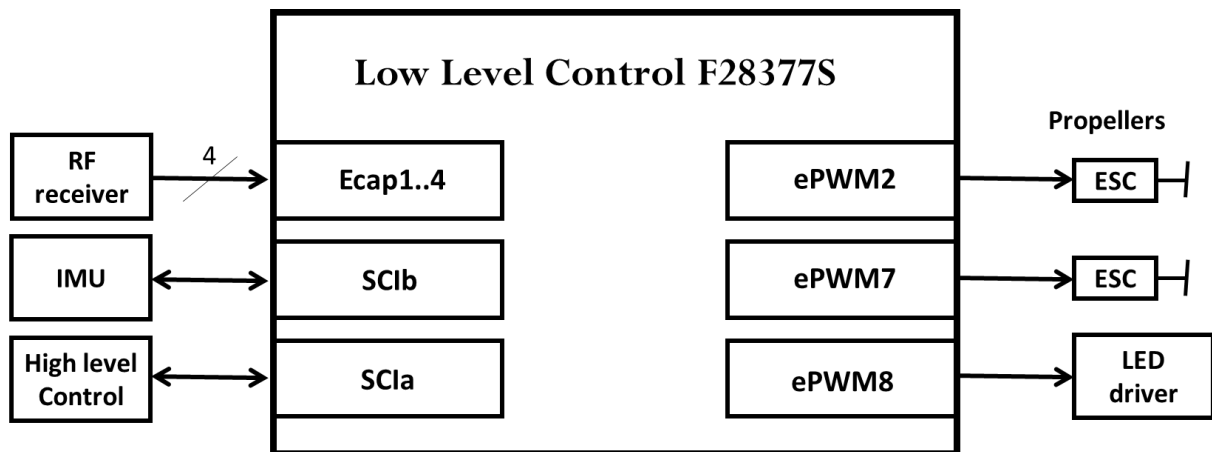
## 2.2. Esquema electrónico del barco

Para conocer mejor la distribución de la electrónica del barco y sus conexiones, es importante la realización de un esquemático donde se pueda apreciar con detalle las comunicaciones entre los distintos dispositivos que conforman el barco.

Para la realización del esquemático, se ha utilizado la herramienta informática llamada KiCad. Un entorno de desarrollo software usado para el diseño de circuitos electrónicos, muy flexible y adaptable, en el que se pueden crear y editar un gran número de componentes. [3]

Como podemos observar en el **Anexo A**, se ha buscado una distribución a partir de bloques estructurales con sus conexiones. Los colores de los cables siguen la siguiente asignación: Rojo (para alimentación (Vcc)), Negro (para masa (GND)), Azul (para los PWM) y Verde (otros).

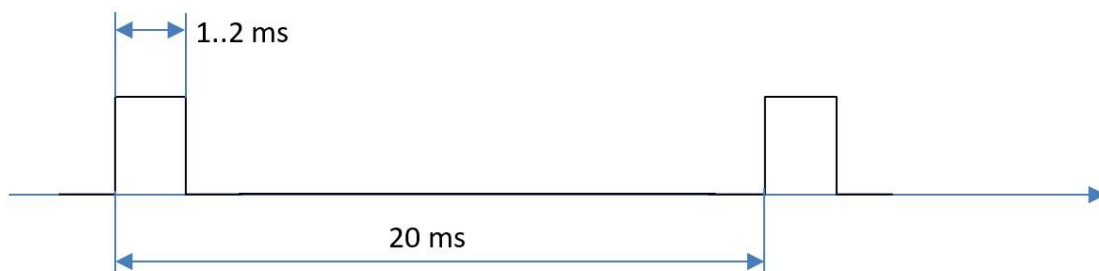
En la Ilustración 3 se puede observar la arquitectura modular del RoboBoat:



*Ilustración 3: Control de bajo nivel RoboBoat: esquema modular*

El primer módulo a describir es el receptor de radiofrecuencia que recibe las órdenes del mando de control manual. Se trata de un receptor de cuatro canales cuyas señales de salida son interpretadas por 4 periféricos de captura (eCAP) del microcontrolador F28377S. Estos periféricos permiten la medición del periodo y del ciclo de trabajo de las señales de tren de impulsos.

Los periféricos eCAP, tal como están configurados, permiten medir la anchura de pulso de una señal, esto es, el tiempo transcurrido entre un flanco de subida y otro de bajada. En radiocontrol, la información se codifica normalmente con el ancho de pulso de una señal PWM. En nuestro caso, las señales entregadas son PWMs de 50HZ con anchos de pulso entre 1 ms (valor mínimo codificado) y 2 ms (valor máximo) igual que en la Ilustración 4:



*Ilustración 4: Señal PWM de 50Hz y ancho de pulso de 1 a 2 ms*

Cada uno de los periféricos está conectado a un canal del receptor RF para leer las funciones del mando radiocontrol. El periférico eCAP1 lee la señal enviada por el joystick izquierdo del controlador para acelerar el RoboBoat.

El periférico eCAP2 lee la señal enviada por el joystick derecho del controlador para la guiñada del RoboBoat, lo que significa girar la proa del barco hacia cualquier lado de la trayectoria que debe seguir. El periférico eCAP3 se utiliza para leer la señal enviada por un interruptor, a través del cual podemos elegir si gobernar del barco de forma manual o automática. Por último, el periférico eCAP4 se usa para leer la señal enviada por otro interruptor para encender o apagar los LEDs que tiene el RoboBoat ubicados en la parte delantera y trasera.

El microcontrolador recibe órdenes del radiocontrol o de la línea serie de mando y actúa sobre el alumbrado y la propulsión. También, es capaz de leer la salida del IMU y enviar esta información a través de la línea serie de comandos.



*Ilustración 5: Mando de control manual*

En la Ilustración 5 se puede observar como es el mando radiocontrol que hace de transmisor al Roboboat. Este transmisor tiene dos palancas, una para el control del acelerador y otra para el control de la dirección del barco.

Siguiendo con el esquema, contamos con un IMU, dispositivo electrónico que mide las velocidades angulares, orientación y fuerzas gravitatorias del barco usando una combinación de acelerómetros y giróscopo. Está conectado al microcontrolador a través de una de sus líneas serie, el SCIB con la siguiente parametrización: 57600 bps, 1 bit de Start y 1 bit de Stop y sin control de paridad. El periodo de envío de tramas es de 25 ms.

RoboBoat puede recibir órdenes de accionamiento de los motores a través de una segunda línea serie, la SCIA, con la siguiente configuración: 9600 bps, 1 bit de Start y 1 bit de Stop y sin control de paridad. Esta línea está destinada a la comunicación con un controlador robótico de alto nivel. En la actualidad este controlador está basado en una Jetson Nano con Linux Ubuntu y ROS (Robotic Operating System). Con la información de diversos sensores (un láser 3D y uno 2D, un IMU, un GPS) calcula las consignas para los motores del barco para el seguimiento de trayectorias y la evitación de obstáculos.

Si vamos al lado derecho de la Ilustración 3, utilizamos tres periféricos ePWM para impulsar los propulsores y para el accionamiento del driver de los LEDs. Las unidades ePWM controlan a los dispositivos ESC, que a su vez son los que controlan a los motores. Los módulos ePWM2 y ePWM7 mandan una señal PWM a los variadores de velocidad con un periodo de 20 ms y un ancho de pulso entre 1 ms y 2 ms (estándar de radiocontrol). El módulo ePWM8 manda otra señal PWM, pero en este caso para la activación o desactivación de los LEDs.

## Capítulo 3

# Modelo de tracción RoboBoat

En el diseño y control de sistemas de propulsión de barcos, resulta fundamental contar con un modelo de tracción que establezca una relación directa entre las tensiones aplicadas a los bornes de los motores y las fuerzas y pares generados por las hélices conectadas a ellos. En este capítulo, veremos la importancia de este modelo y su implicación en el desarrollo de sistemas de propulsión.

Para desarrollar un modelo de tracción más preciso, se realizan pruebas donde se mide la fuerza requerida para arrastrar el barco a diferentes velocidades y cargas. A partir de estos datos, se puede ajustar un modelo que tenga en cuenta los factores específicos del RoboBoat y las hélices utilizadas.

Al trabajar con motores comerciales de radiocontrol no se dispone de sus especificaciones y, por lo tanto, la determinación del modelo de tracción debe hacerse completamente de forma experimental.

Para ello, se diseñó un experimento consistente en aplicar diversas tensiones a cada uno de los motores del RoboBoat por separado y medir las fuerzas generadas por cada hélice igual que se documenta en [4]. Para la medición de fuerzas se utilizaron un conjunto de dinamómetros.

A raíz de una serie de experimentos preliminares, llegamos a la conclusión de que las fuerzas de las hélices no eran ni iguales ni uniformes e identificamos distintos valores de fuerza para cada una de ellas. Posteriormente, se realizaron otros experimentos que dieron lugar a los datos con los que se ha establecido el modelo de propulsión y que se recogen en las tablas recogidas en el **Anexo B**.

Con los valores hallados en los experimentos donde aplicamos diferentes voltajes a cada motor, obtenemos 3 ecuaciones para este modelo:

Una para el voltaje positivo de la hélice derecha (en tanto por uno) mayores a 0.25V, una para el voltaje positivo de la hélice izquierda (en tanto por uno) mayores a 0.25V y otra para voltajes negativos (en tanto por uno también) menores a -0.25V.

- Ecuación hacia adelante de la hélice derecha (en rojo en la Ilustración 6 y 7):

- 

$$V_d = -0.0326 f_d^2 + 0.2141 f_d - 0.2606$$

- Ecuación hacia adelante de la hélice izquierda (en naranja en la Ilustración 6 y 7):

$$V_i = -0.0454 f_i^2 + 0.282 f_i + 0.2477$$

- Ecuación hacia atrás para una hélice (en azul en la Ilustración 6 y 7):

$$V = 0.085 f^2 + 0.2772 f - 0.1183$$

El parámetro  $f_d$  es la fuerza de la hélice derecha y el parámetro  $f_i$  es la fuerza de la hélice izquierda. El parámetro  $f$  lo utilizamos para definir cualquier fuerza de las hélices sin distinción y  $f_p$  es la fuerza de propulsión de las dos hélices:

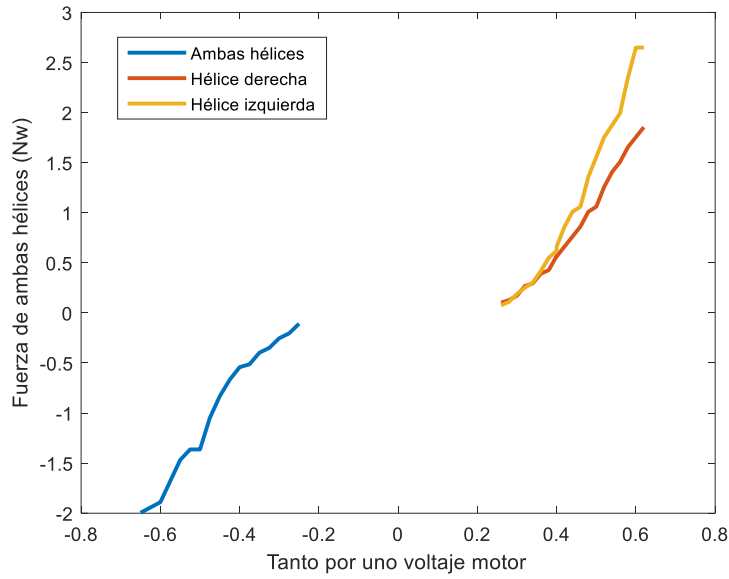
$$f_p = f_d + f_i$$

El par de dirección  $T_s$  se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$T_s = B \cdot \frac{(f_d - f_i)}{2}$$

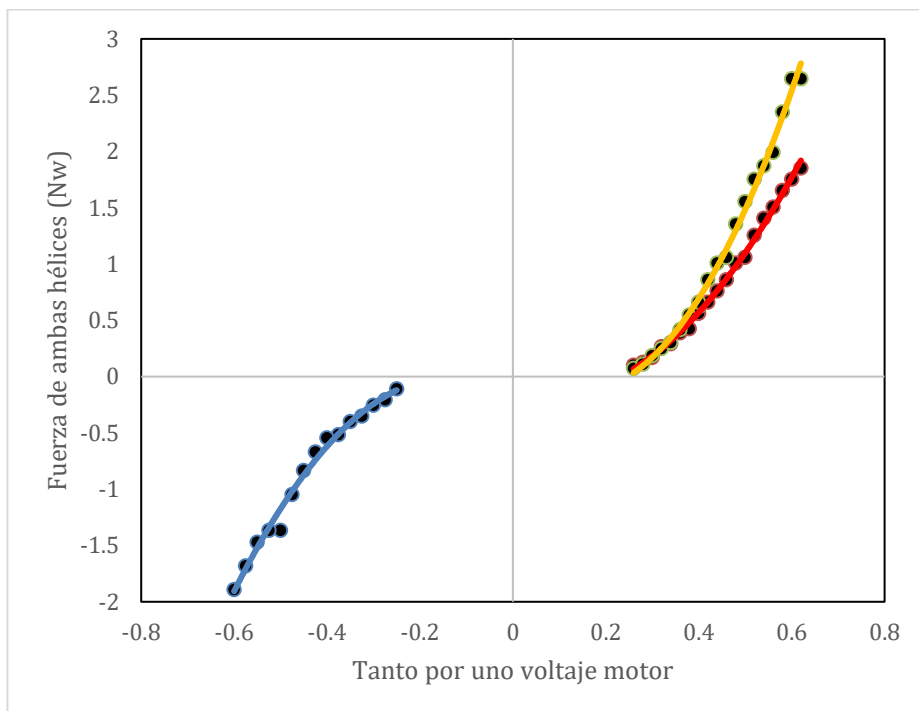
siendo B la distancia entre las hélices.

En la Ilustración 6 se pueden apreciar los valores de fuerza correspondientes a cada hélice en función del voltaje del motor para el sistema de propulsión que tiene el RoboBoat.



*Ilustración 6: Valores de fuerza de ambas hélices frente a voltaje del motor*

La verificación final de este capítulo se puede contemplar en la Ilustración 7 donde se aprecian las tres ecuaciones descritas anteriormente. También, se puede observar una zona muerta donde se exponen aquellos valores de voltaje para los que no conseguimos ninguna fuerza en las hélices. Dicha banda muerta se encuentra entre -0.25V y 0.25V.



*Ilustración 7: Representación de las ecuaciones obtenidas para el modelo de tracción*

## Capítulo 4

# Identificación de modelo dinámico de RoboBoat

En el marco del proyecto de investigación ARDUA (Despliegue autónomo y semiautónomo de robots para aplicaciones subterráneas, PID2019-105390RB-I00) se ha desarrollado totalmente un barco robotizado denominado RoboBoat. Se ha visto la necesidad de obtener un modelo dinámico de este robot para facilitar el diseño de su control y navegación.

Existen muchos modelos muy complejos para describir la cinemática y la hidrodinámica del movimiento de los buques de superficie, pero en nuestro caso, el RoboBoat está pensado para trabajar en aguas tranquilas, sin viento, corrientes ni oleaje, se decidió asumir un modelo dinámico simplificado 2D. En particular, se ha asumido el modelo presentado en [4] con tres grados de libertad: movimiento en el plano XY y giro en el eje Z:

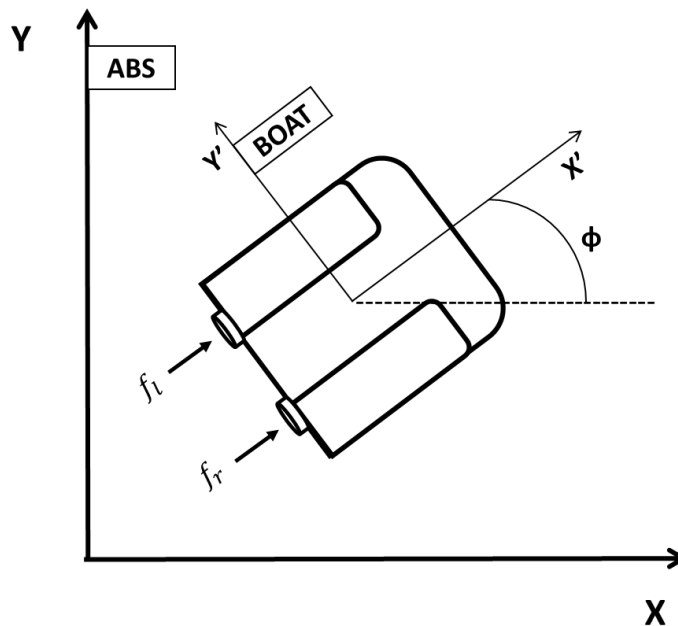
$$\begin{aligned}m_{11} \dot{v}_x - m_{22} v_y w + d_1 \operatorname{sign}(v_x) |v_x|^{\alpha_1} &= f_p \\m_{22} \dot{v}_y + m_{11} v_x w + d_2 \operatorname{sign}(v_y) |v_y|^{\alpha_2} &= 0 \\m_{33} \dot{w} + (m_{22} - m_{11}) v_x v_y + d_3 \operatorname{sign}(w) |w|^{\alpha_3} &= T_s\end{aligned}$$

En este modelo solo se tiene en cuenta la propulsión de las hélices mediante  $f_p$  y  $T_s$ . El objetivo es identificar los parámetros intrínsecos que acompañan a las velocidades lineales y a la velocidad de rotación planteadas en este modelo para el barco RoboBoat.

Se deben recopilar datos experimentales sobre el comportamiento del barco en diferentes condiciones de operación para obtener el comportamiento del barco.

## 4.1. Marco de referencia

El marco de referencia utilizado se puede observar en la Ilustración 8, donde el sistema de referencia ABS o absoluto es el marco fijo a tierra y el sistema de referencia BOAT es el marco fijo al cuerpo, en este caso al RoboBoat, con su origen en el centro de masa del barco.



*Ilustración 8: Ejes de referencia*

En las ecuaciones presentes en el trabajo donde no se especifique el sistema de referencia utilizado, se referirán al marco fijo al cuerpo, BOAT.

Los tres movimientos que nuestro modelo de catamarán ignora son el balanceo, cabeceo y el movimiento en el eje Z, ya que se trata de una simplificación 2D, es suficiente porque el catamarán navegará en aguas tranquilas en las que el oleaje será mínimo. Por esta razón, las coordenadas del centro de masa son  $[x_{boat}^{ABS}, y_{boat}^{ABS}]^T$ ,  $\phi$  es el ángulo de orientación del barco y  $w$  es la velocidad angular del barco.

La relación cinemática se define como:

$$v_x^{ABS} = v_x \cos(\varphi) - v_y \sin(\varphi)$$

$$v_y^{ABS} = v_x \sin(\varphi) + v_y \cos(\varphi)$$

$$w = \dot{\varphi}$$

## 4.2. Método de identificación

Usando la propuesta de estimación presentada en [4] y en [5], debemos conocer varios parámetros para poder utilizar este modelo dinámico simplificado con éxito. En este caso, será necesario conocer los 3 términos de masa ( $m_{11}$ ,  $m_{22}$  y  $m_{33}$ ) y los 6 coeficientes de amortiguamiento no lineales ( $d_i$ ,  $\alpha_i$ ).

Cuando los barcos se desplazan en el agua, arrastran junto a ellos un cierto volumen de agua aumentando la ‘masa en movimiento’ y, por lo tanto, debe tenerse en cuenta a efectos de cualquier cálculo de fuerzas y energías. Los términos de masa añadida representan estos cálculos y se definen como “los términos utilizados para expresar las fuerzas de inercia que ejerce el fluido sobre un sólido, debida a la aceleración del mismo sólido”. [6]. Los términos de masa se calculan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$m_{11} \approx m + 0.05 \cdot m = \mathbf{9.135 \text{ kg}}$$

$$m_{22} \approx m + 0.05 \cdot (\rho \cdot D^2 \cdot L) = \mathbf{16.8681 \text{ kg}}$$

$$m_{33} \approx \frac{m \cdot (L^2 + W^2) + \frac{1}{2} (0.01 \cdot m \cdot B^2 + \rho \cdot \pi \cdot D^2 L^3)}{12} = \mathbf{0.4985 \text{ kg}}$$

donde  $m$  es la masa del barco,  $\rho$  es la densidad del agua,  $D$  es la profundidad sumergida,  $L$  es la longitud del barco,  $W$  es la anchura del barco y  $B$  es la distancia entre las hélices.

Restringiendo el movimiento del barco a uno de los grados de libertad (X, Y o giro) se eliminan los términos cruzados de las expresiones. Así, las expresiones para cada uno de los ejes quedan:

$$m_{11} \dot{v}_x + d_1 \text{sign}(v_x) |v_x|^{\alpha_1} = f_p \text{ (movimiento únicamente en } x)$$

$$m_{22} \dot{v}_y + d_2 \text{sign}(v_y) |v_y|^{\alpha_2} = 0 \text{ (movimiento únicamente en } y)$$

$$m_{33} \dot{w} + d_3 \text{sign}(w) |w|^{\alpha_3} = T_s \text{ (únicamente giro)}$$

Si  $f_p$  (fuerza generada por las hélices) y  $T_s$  (par generado por las hélices) son constantes, las expresiones del eje X y del giro llegarán al régimen permanente haciéndose el término de la derivada de la velocidad cero. Así obtenemos:

$$d_1 \text{sign}(v_x) |v_x|^{\alpha_1} = f_p$$

$$d_3 \text{sign}(w) |w|^{\alpha_3} = T_s$$

Aplicando diversas fuerzas de propulsión constantes mediante las hélices y midiendo las velocidades  $v_x$  de régimen permanente se pueden estimar los coeficientes de amortiguación no lineal  $\alpha_1$  y  $d_1$  mediante mínimos cuadrados. De la misma forma, aplicando diversos pares constantes con las hélices ( $f_p = 0$ ) y midiendo la velocidad angular de régimen permanente se pueden estimar  $\alpha_3$  y  $d_3$ .

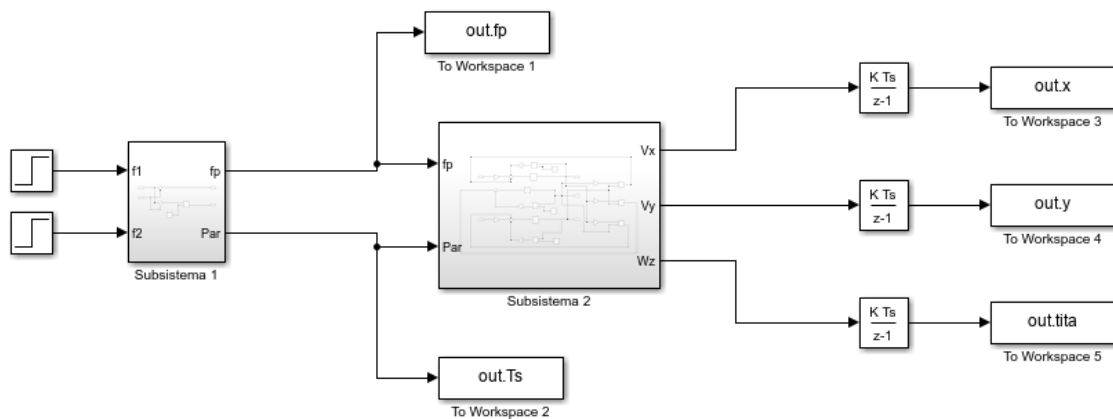
La expresión del movimiento en el eje Y necesita una consideración especial. El modelo dinámico simplificado adoptado no considera fuerzas exteriores como el viento, oleaje o corrientes. Sin embargo, las hélices no pueden generar un movimiento exclusivamente en el eje Y. Por ello, para la determinación de  $d_2$  y  $\alpha_2$  de forma similar a los otros ejes, se debe aplicar una fuerza exterior en la dirección Y. En régimen permanente:

$$d_2 \text{sign}(v_y) |v_y|^{\alpha_2} = f_y$$

Así se puede proceder de la misma forma que en los otros dos ejes.

### 4.3. Diseño modelo dinámico en Simulink

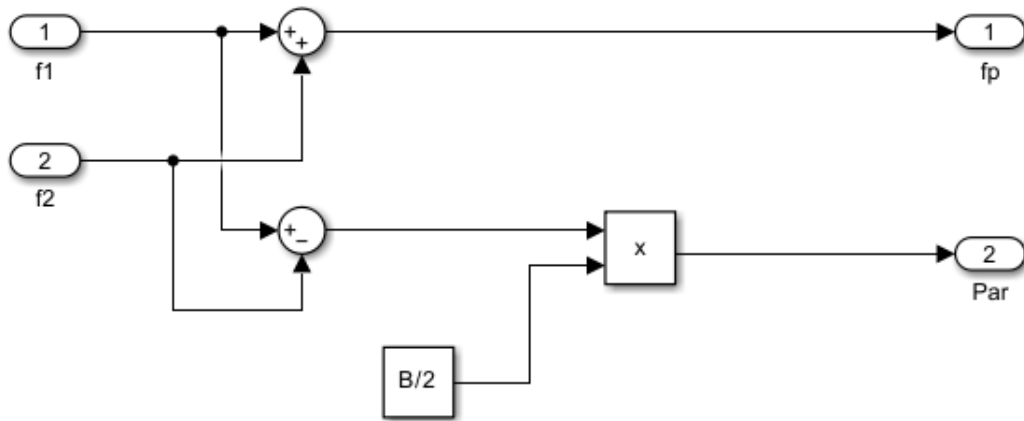
La representación de las ecuaciones del modelo dinámico se hizo a partir del entorno de software Simulink utilizando una interfaz gráfica a partir de diagramas de bloques. Este software admite sistemas lineales, sistemas no lineales, modelos en tiempo continuo, modelos en tiempo discreto o un híbrido entre estos dos últimos. En nuestro caso vamos a utilizar un modelo en tiempo discreto porque trabajamos con elementos dinámicos que cambian de valor, afectan o son afectados por otros como los mencionados.



*Ilustración 9: Modelo dinámico a partir de diagramas de bloques*

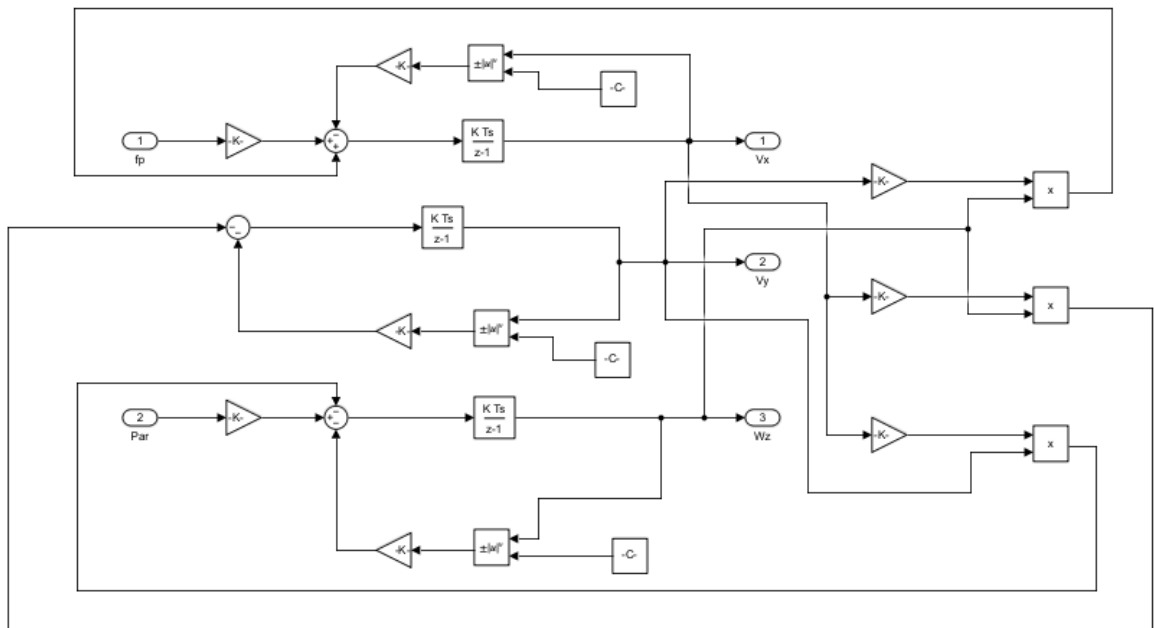
En la Ilustración 9 se observa una vista general del modelo dinámico en Simulink. Comenzando por la izquierda de la ilustración, se incorporan dos entradas en escalón con las fuerzas que se introducen en las hélices en un sistema real, dos bloques estructurales con sus respectivas entradas y salidas, 3 bloques integradores discretos para pasar las velocidades lineales y la velocidad angular a variables de posición lineal y de posición angular respectivamente. Por último, añadimos un bloque llamado 'To Workspace' para pasar estas variables desde Simulink a Matlab para tener la capacidad después de utilizar estos valores en un simulador gráfico.

El siguiente paso es explicar los dos bloques estructurales que lleva nuestro modelo dinámico:



*Ilustración 10: Subsistema 1 del modelo dinámico*

En el primer bloque estructural visualizado en la Ilustración 10, las entradas que aparecen son las fuerzas de cada hélice y a partir de bloques sumadores y multiplicadores, describimos las ecuaciones para hallar la fuerza total de las hélices y el par total que ejercen.



*Ilustración 11: Subsistema 2 del modelo dinámico*

En el segundo bloque estructural visualizado en la Ilustración 11, las entradas que aparecen son la fuerza total de las hélices y el par total del subsistema anterior. A partir de bloques sumadores, multiplicadores, exponenciales, de ganancia y bloques integradores discretos describimos las ecuaciones del modelo de [4] para hallar las velocidades lineales y la velocidad angular. Con este modelado conseguimos simular y analizar el sistema en apartados posteriores.

## 4.4. Herramientas usadas

En la estimación paramétrica se han utilizado las siguientes herramientas:

1. Modelo de tracción. Nos permite generar las fuerzas de propulsión deseadas en cada hélice y los pares.
2. Computador de navegación. Genera las órdenes de movimiento (fuerzas en las hélices izquierda y derecha) para el barco. Se trata de una JETSON NANO con ROS Melodic sobre Linux UBUNTU 18.04.5 LTS.
3. Un IMU Phidgets Spatial 3/3/3. Dispone de acelerómetro, giróscopo y magnetómetro de tres ejes. El giróscopo permite medir la velocidad angular con precisión.
4. Un GPS diferencial. El núcleo de la estación base y el módulo montado en el barco son ambos módulos DP0601 con el integrado u-blox RTK ZED-F9P. Ambos están comunicados por módulos XBee a 2.4MHz. Con esta configuración se consigue un diferencial RTK con precisiones por debajo del centímetro. Este GPS permite medir la posición y velocidad del barco en la referencia absoluta con precisión.
5. La “toolbox” de Matlab “Curve Fitter”. Permite aplicar el ajuste por mínimos cuadrados para la identificación de parámetros.

Los ensayos de identificación de parámetros se realizaron en una piscina de 8x15 m en las afueras de la ciudad de Huesca. La estación base GPS se instaló en las inmediaciones sobre un trípode topográfico con base nivelante como podemos observar en la Ilustración 12:

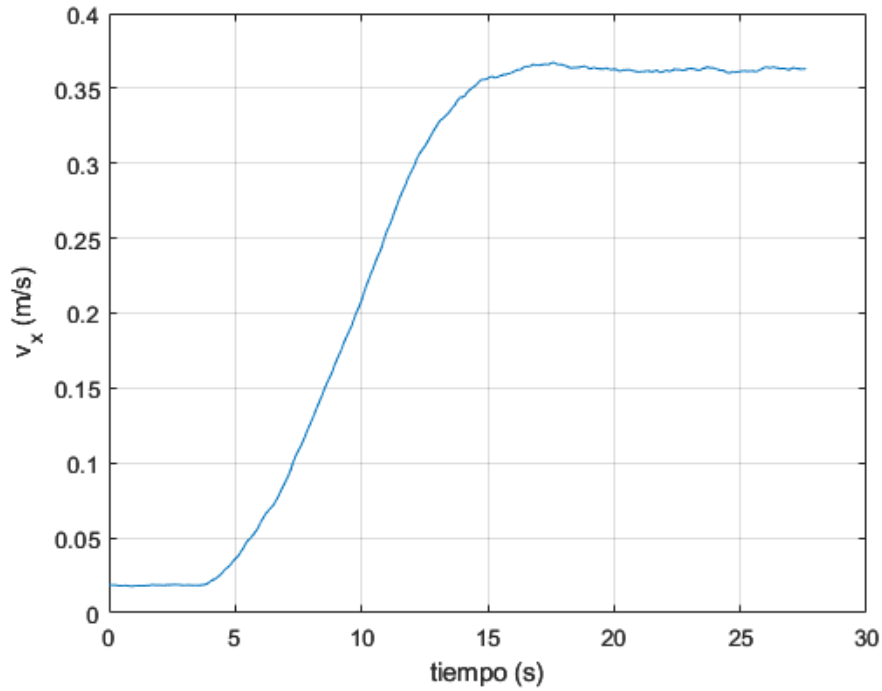


*Ilustración 12: Núcleo de la estación Base GPS*

A continuación, se presentan los diferentes ensayos realizados. Con estas pruebas conseguiremos hallar datos, identificar cualquier tipo de fallo y comprobar los problemas que nos aparecen en la ejecución real.

#### **4.5. Parámetros $d1$ , $\alpha1$ / eje $x$**

Ensayos realizados los días 05/05/2022, 09/11/2022 y 24/02/2023. Los dos primeros días se realizó una prueba de concepto y el último se tomaron las medidas definitivas. El experimento consistió en generar un conjunto de fuerzas de propulsión iguales en ambas hélices. Esto proporciona un desplazamiento en línea recta hacia adelante. Las velocidades de régimen permanente fueron medidas con el GPS diferencial. La Ilustración 13 muestra, a modo de ejemplo,  $v_x$  en función del tiempo cuando se aplica en cada hélice una fuerza de 0.7 Nw.



*Ilustración 13: Cada hélice proporciona 0.7 Nw, por lo tanto, el par es nulo y la fuerza de tracción total es de 1.4 Nw. Al cabo de 15 segundos se alcanza el régimen permanente  $v_x = 0.37$  m/s.*

$f_i = f_d$ (Nw)	$f_p$ (Nw)	$v_x$ (m/s)
0.2	0.4	0.2
0.4	0.8	0.28
0.5	1.0	0.31
0.6	1.2	0.35
0.7	1.4	0.37
0.9	1.8	0.41
1.0	2.0	0.44
1.1	2.2	0.46
1.2	2.4	0.51

*Tabla 1: Régimen permanente de  $v_x$  para diferentes  $f_p$ .*

La tabla 1 muestra los resultados de 9 ensayos diferentes. El último de los valores se desestima por ser un dato evidentemente erróneo (*outlier*). Con los mínimos cuadrados de la aplicación *CurveFitter* se obtienen los siguientes valores:

$$d_1 = 10.94, \quad \alpha_1 = 2.061 \text{ con } RS = 0.9968$$

La Ilustración 14 muestra el ajuste de los puntos con el que hemos hallado los valores anteriores:

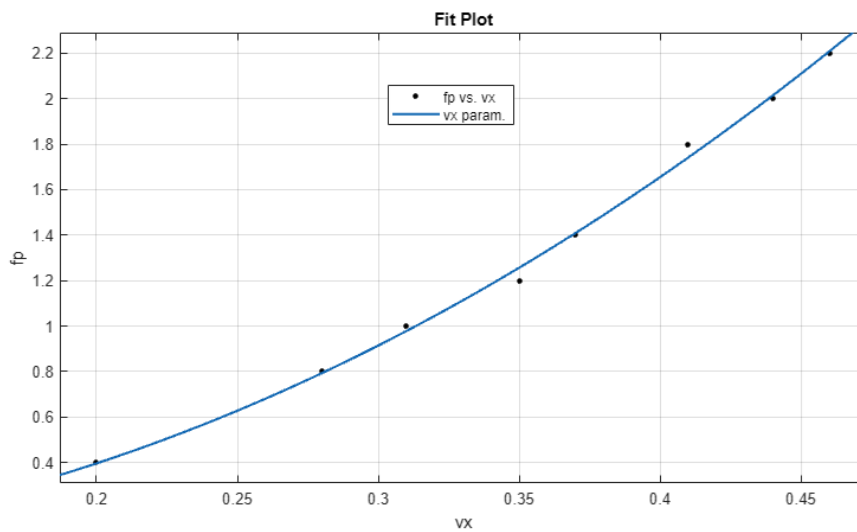


Ilustración 14: Ajuste por mínimos cuadrados de la función  $dI|vx|\alpha I = fp$ .

## 4.6. Parámetros $d2$ , $\alpha 2$ / eje y

Ensayos realizados los días 05/05/2022 y 24/02/2023. En el primero se intentó un ensayo diferente con trayectorias circulares para deducir los parámetros del eje Y sin resultados aceptables. Debido a que las hélices del RoboBoat no pueden generar un movimiento directamente en el eje Y, el experimento consistió en generar un conjunto de fuerzas laterales mediante un sedal, unas poleas y pesos medidos, tal como muestra la Ilustración 15. Esto proporciona un desplazamiento en línea recta lateral. Las velocidades de régimen permanente fueron medidas con el GPS diferencial. La Ilustración 16 muestra, a modo de ejemplo,  $v_y$  en función del tiempo cuando se aplica una fuerza de 9.319 Nw.

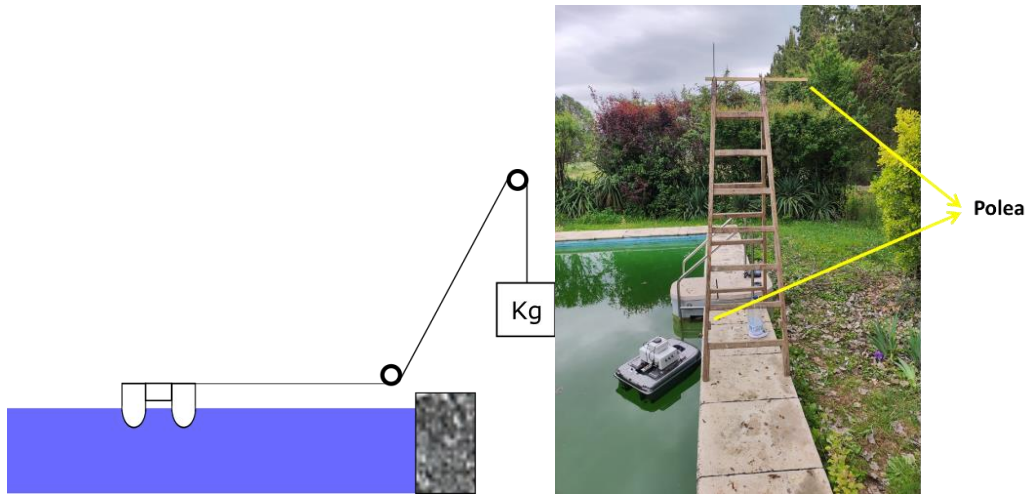


Ilustración 15: Esquema del sistema de poleas empleado para la tracción lateral y fotografía del dispositivo

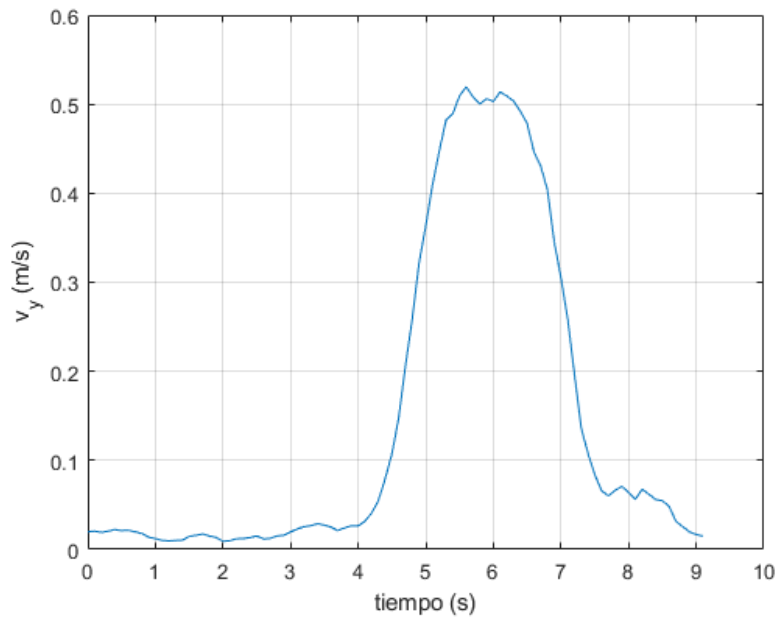


Ilustración 16: El barco es traccionado lateralmente con una fuerza de 9.319 Nw.  $v_y$  alcanza su régimen permanente a los 5.5 s.

<b>Fy (Nw)</b>	<b>Vy (m/s)</b>
1.578	0.215
1.793	0.249
5.351	0.377
8.203	0.448
9.319	0.494

Tabla 2: Régimen permanente de  $v_y$  para diferentes  $f_y$ .

La tabla 2 muestra los resultados de 5 diferentes ensayos. Con los mínimos cuadrados de la aplicación *CurveFitter* se obtienen los siguientes valores:

$$d_2 = 44.78, \alpha_2 = 2.181 \text{ con } RS = 0.9887$$

La Ilustración 17 muestra el ajuste de los puntos con el que hemos hallado los valores anteriores:

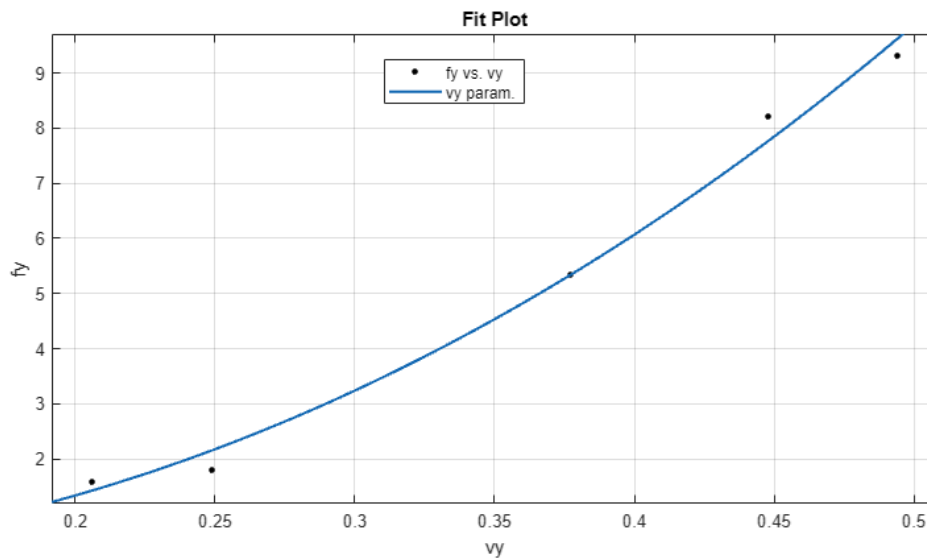
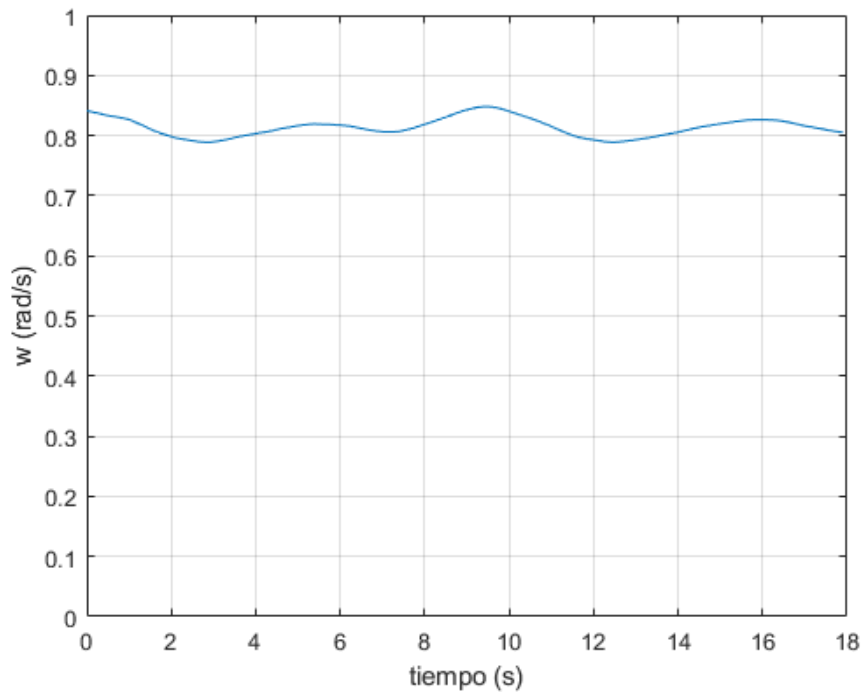


Ilustración 17: Ajuste por mínimos cuadrados de la función  $d_2|v_y|a_2 = f_y$

## 4.7. Parámetros $d_3$ , $\alpha_3$ / giro

Ensayos realizados los días 05/05/2022, 09/11/2022 y 24/02/2023. Los dos primeros días se realizó una prueba de concepto y el último se tomaron las medidas definitivas. El experimento consistió en generar un conjunto de fuerzas de propulsión iguales y de sentido contrario en ambas hélices. Se genera un par sin fuerza de propulsión longitudinal que provoca el giro sobre sí mismo del barco ( $v_x = 0.0$ ,  $v_y = 0.0$ ). Las velocidades angulares de régimen permanente fueron medidas con el giróscopo del IMU. La Ilustración 18 muestra, a modo de ejemplo,  $w$  en función del tiempo cuando se aplica en cada hélice una fuerza de 1.1 Nw de sentidos contrarios, lo que genera un par de 0.2816Nwm.



*Ilustración 18: El barco gira sobre sí mismo al aplicarle un par de 0.2816 Nwm. Se muestra la velocidad angular (en media 0.814 rad/s) del barco en régimen permanente durante varios giros.*

<b>fi = -fd (Nw)</b>	<b>Ts (Nwm)</b>	<b>w media (rad/s)</b>
0.2	0.0512	0.315
0.3	0.0768	0.405
0.4	0.1024	0.473
0.5	0.1280	0.520
0.6	0.1536	0.586
0.7	0.1792	0.656
0.8	0.2048	0.712
0.9	0.2304	0.744
1.0	0.2560	0.791
1.1	0.2816	0.814
1.2	0.3072	0.839

*Tabla 3: Régimen permanente de w para varios Ts (distancia entre hélices B=0.256m)*

La tabla 3 muestra los resultados de 11 ensayos diferentes. Con los mínimos cuadrados de la aplicación *CurveFitter* se obtienen los siguientes valores:

$$d_3 = 0.4077, \quad \alpha_3 = 1.864 \text{ con } RS = 0.9919$$

La Ilustración 19 muestra el ajuste de los puntos con el que hemos hallado los valores anteriores:

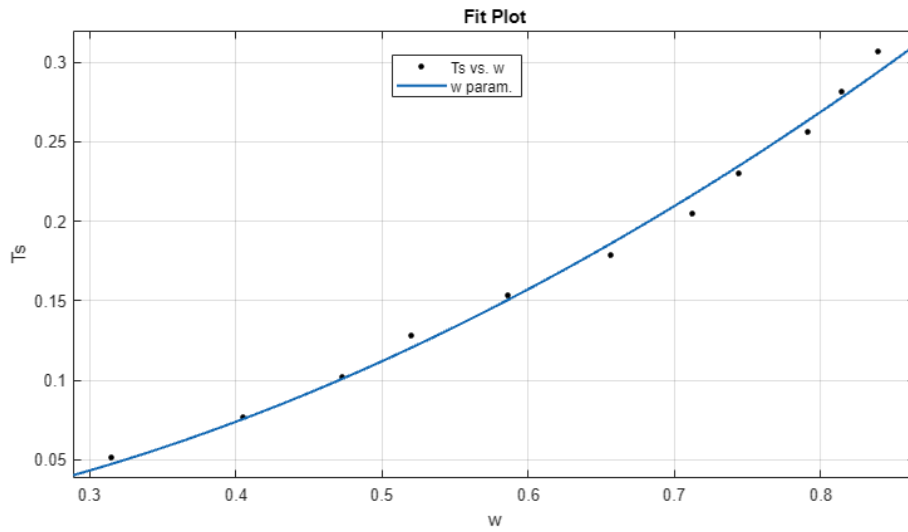


Ilustración 19: Ajuste por mínimos cuadrados de la función  $d3|w|\alpha3 = Ts$

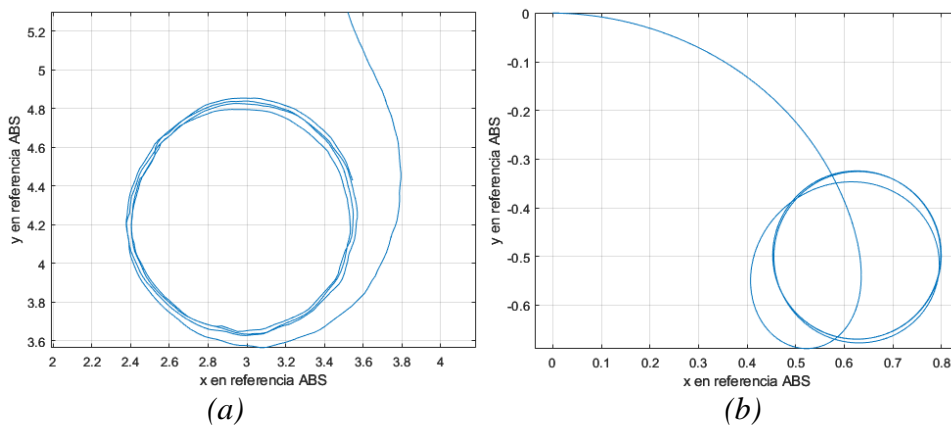
## 4.8. Modelo identificado y validación

Recapitulando, los parámetros identificados del modelo dinámico son los presentados en la tabla 4.

<b>m<sub>11</sub></b>	9.135 Kg
<b>m<sub>22</sub></b>	16.868 Kg
<b>m<sub>33</sub></b>	0.498 Kg
<b>α<sub>1</sub></b>	2.061
<b>α<sub>2</sub></b>	2.181
<b>α<sub>3</sub></b>	1.864
<b>d<sub>1</sub></b>	10.94
<b>d<sub>2</sub></b>	44.78
<b>d<sub>3</sub></b>	0.4077

Tabla 4: Parámetros identificados de RoboBoat

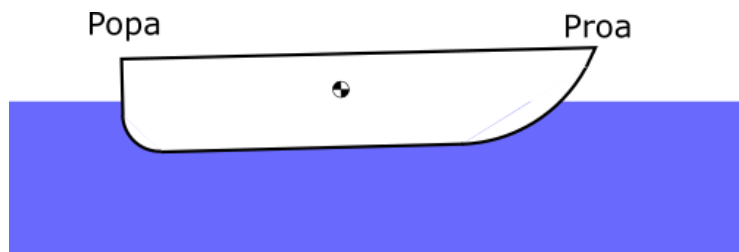
Con objeto de validar el modelo identificado, el día 24/02/2023 en la misma piscina de pruebas, se realizaron diversos ensayos de navegación en círculos y en ocho. La ilustración 20 (a) muestra la traza de uno de estos ensayos obtenida mediante el GPS diferencial. El barco, impulsado únicamente por la hélice izquierda con 1.0Nw, realizó círculos en régimen permanente de 1.155m de diámetro. Esta misma situación se simuló con el modelo dinámico obtenido con los ensayos. El barco simulado realiza también una trayectoria circular, pero de un diámetro muy inferior, 0.346m. Obviamente, esta gran discrepancia no nos permite validar el modelo dinámico obtenido.



*Ilustración 20: Trayectoria circular del barco al aplicar 1.0 Nw en la hélice izquierda y 0.0 Nw en la derecha. (a) El diámetro real del círculo en régimen permanente es de 1.155m. (b) El diámetro obtenido mediante simulación con el modelo dinámico es tan solo de 0.34*

Dentro del grupo de investigación se inició una discusión intentando determinar el problema. Se revisaron los ensayos y se intentó ajustar los parámetros de forma manual. Los ensayos estaban bien hechos y si se ajustan los parámetros para que se ajuste al círculo de validación, el modelo falla en otras situaciones.

El modelo dinámico adoptado supone que el barco es simétrico en todos los ejes con respecto al centro de gravedad y que este coincide con el centro de flotación. Entonces, se planteó la hipótesis de alguna disimetría en alguno de los ejes. Esta disimetría se evidencia sobre todo en el desplazamiento lateral. Tal como muestra la Ilustración 21, la popa y la proa no presentan el mismo perfil al desplazamiento lateral. Por una parte, proa y popa tienen distinta forma y por otra la popa está más hundida debido al reparto de masas y a la impulsión de las hélices.

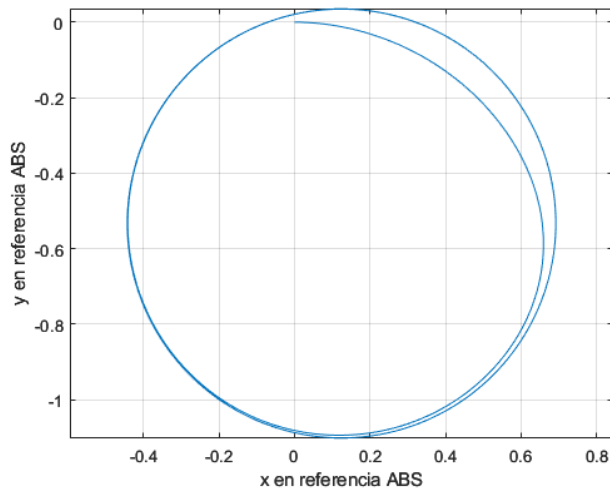


*Ilustración 21: La popa del barco presenta más resistencia al avance lateral que la proa*

Al haber un avance lateral, la popa del barco presenta más resistencia que la proa. Esto se traduce en la aparición de un par que tiende a girar el barco. Por ello se decidió añadir un término a las expresiones de modelo dinámico dependiente de  $v_y$ . Este término es un par que se suma al provocado por las hélices cuando  $v_y$  no es cero. La propuesta es sustituir la expresión del giro por:

$$m_{33} \dot{w} + (m_{22} - m_{11})v_x v_y + d_3 \text{sign}(w)|w|^{\alpha_3} = T_s + d_s \text{sign}(v_y)|v_y|^2$$

En este caso se optó por un término cuadrático por simplicidad. El parámetro  $d_s$  se ajustó de forma que el círculo simulado se igualara al descrito por el barco. Esto se consigue con:



*Ilustración 22: Trayectoria circular del barco al aplicar 1.0 Nw en la hélice izquierda y 0.0 Nw en la derecha en simulación con  $ds = 13.5$ . El diámetro obtenido es igual al real.*

La figura 22 muestra la trayectoria simulada con la inclusión de este nuevo término.

Este nuevo modelo se ha probado variando la fuerza de la hélice desde 0.2Nw hasta 1.2Nw, y en todos los casos la discrepancia del diámetro del círculo no supera los 5cm.

# Capítulo 5

## Simulador basado en el modelo

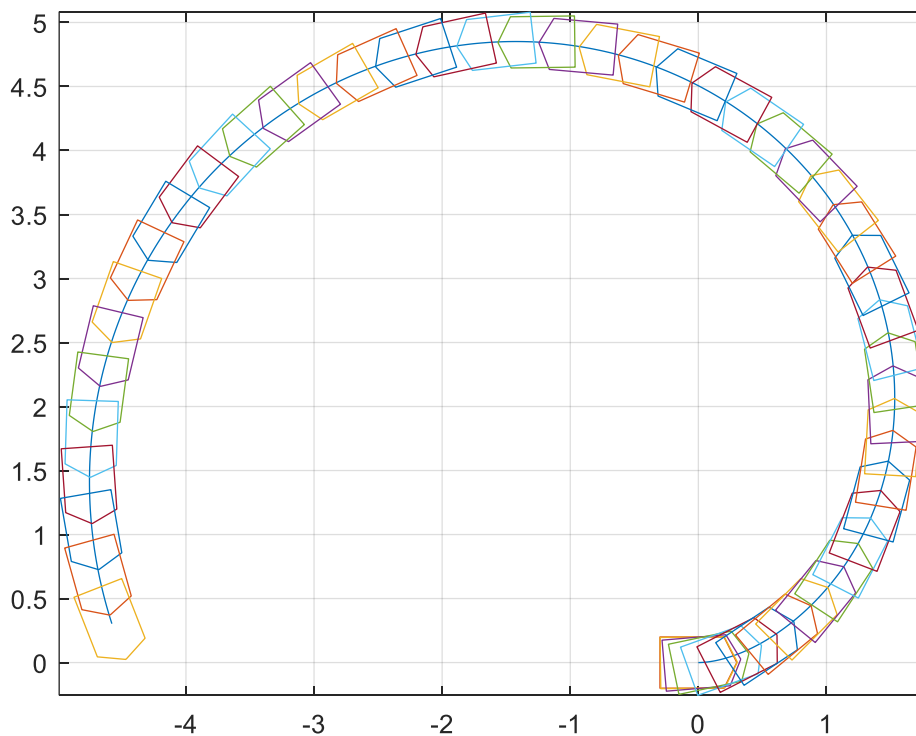
Para simular el movimiento de un barco en Matlab, necesitamos especificar las condiciones iniciales del barco, como su posición y velocidad, así como las fuerzas que actúan sobre él.

El objetivo de este apartado es verificar la dinámica del barco para obtener los valores deseados, y a partir de ahí, el trabajo consistirá en implementar un regulador al RoboBoat y que los resultados sean los esperados en la realidad.

La implementación de este simulador es muy importante para nosotros, ya que nos va a ayudar a controlar el movimiento del barco. Con una trayectoria simulada, podemos ajustar y corregir su movimiento para que el barco navegue de forma más precisa. Esto nos facilita la planificación de rutas o experimentos que se quieran realizar en el futuro. Además, nos permitirá evaluar su rendimiento en términos de velocidad y estabilidad por si se necesitasen hacer ajustes en el barco para mejorar su rendimiento.

Primero, se definen las constantes del problema, como la masa del barco, la longitud y la anchura del barco, la densidad del agua, la distancia entre las hélices del barco, los términos de masa añadida, las fuerzas de las hélices, etc. El siguiente paso es ejecutar el modelo dinámico que se presentó en el apartado 4.2 de este trabajo para obtener las posiciones y los ángulos del barco en cada instante de tiempo.

Utilizando este simulador, calculamos las velocidades mediante las ecuaciones del modelo dinámico. En cuanto a la trayectoria, empleamos la odometría, una técnica comúnmente utilizada en robótica y en navegación para estimar la posición y orientación del RoboBoat. A través de un sencillo bucle, obtenemos los cambios en la posición que posteriormente visualizamos en una representación gráfica como se muestra en la siguiente figura:



*Ilustración 23: Visualización de la trayectoria del RoboBoat a partir del simulador*

En la Ilustración 23 podemos observar cómo, a partir de Matlab, pintamos las posiciones del RoboBoat en el espacio en función de unos datos de entrada.

# Capítulo 6

## Controlador a modo de validación

La realización de un controlador para un barco radiocontrol es un proceso que requiere un cuidadoso cálculo y validación. Un controlador bien diseñado es esencial para garantizar un rendimiento óptimo del RoboBoat por sus fines científicos y de investigación.

Para la verificación del controlador, es necesario garantizar un funcionamiento correcto y preciso. Esto incluye, entre otras cosas, la realización de simulaciones que se implementarán en este capítulo.

En nuestro caso, vamos a realizar un controlador que se adapte al modelo del RoboBoat para obtener un mejor desempeño. La técnica utilizada es control por espacio de estados relacionados por ecuaciones diferenciales de cualquier orden que se combinan en una ecuación diferencial matricial de primer orden [7].

El primer paso es linealizar las ecuaciones no lineales del sistema que, por su complejidad, no pueden ser analizados directamente, lo que implica tomar una aproximación lineal de las ecuaciones alrededor de un punto de equilibrio. Sustituyendo las derivadas de las ecuaciones por 0, se verifican las ecuaciones del sistema y en nuestro caso, cuando  $\dot{v}_x = 0, \dot{v}_y = 0$  ó  $\dot{w}_z = 0$ , implica que las velocidades se mantendrán constantes en ese punto debido a que su derivada es igual a cero.

Consideramos cuatro comportamientos en nuestro sistema para los cuales realizaremos el control, estos casos son cuando estimemos velocidades bajas o velocidades altas en dirección horizontal, giros suaves o giros bruscos.

Con los datos obtenidos anteriormente, las expresiones para cada uno de los ejes quedan:

$$\begin{aligned} \dot{v}_x - 1.85 \cdot v_y w + 1.2 \cdot \text{sign}(v_x) |v_x|^{2.061} &= 0.11 \cdot f_p \\ \dot{v}_y + 0.54 \cdot v_x w + 2.65 \cdot \text{sign}(v_y) |v_y|^{2.181} &= 0 \\ \dot{w} + 15.47 \cdot v_x v_y + 0.81 \cdot \text{sign}(w) |w|^{1.864} &= 2 \cdot T_s + 27 \cdot \text{sign}(v_y) |v_y|^2 \end{aligned}$$

Comenzamos la linealización utilizando los valores numéricos establecidos en las tres ecuaciones anteriores. La precisión de estos valores de linealización son importantes para lograr una simulación matemática que converja y finalice de manera apropiada. Por lo tanto, nos encargamos de obtener las matrices de forma genérica, de modo que fueran aplicables a todos los escenarios.

Tras llevar a cabo la linealización de las expresiones, obtenemos la siguiente representación matricial:

Matriz A

$$= \begin{pmatrix} -d_1 \frac{\alpha_1}{m_{11}} \text{sign}(v_{x0}) |v_{x0}|^{\alpha_1-1} & \frac{m_{22}}{m_{11}} w_0 & \frac{m_{22}}{m_{11}} v_{y0} \\ -\frac{m_{11}}{m_{22}} w_0 & -d_2 \frac{\alpha_2}{m_{22}} \text{sign}(v_{y0}) |v_{y0}|^{\alpha_2-1} & -\frac{m_{11}}{m_{22}} v_{x0} \\ -\frac{(m_{22} - m_{11})}{m_{33}} v_{y0} & -\frac{(m_{22} - m_{11})}{m_{33}} v_{x0} + 2d_s v_{y0} & -d_3 \frac{\alpha_3}{m_{33}} \text{sign}(w_0) |w_0|^{\alpha_3-1} \end{pmatrix}$$

$$\text{Matriz B} = \begin{pmatrix} \frac{1}{m_{11}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_{33}} \end{pmatrix}$$

Nuestro objetivo al utilizar la técnica de control por espacio de estados fue asignar los polos del sistema en posiciones específicas para lograr un comportamiento deseado. En este caso, hemos decidido que la dinámica deseada se caracterice por una sobreoscilación del 0% y un tiempo de respuesta de 2.5 segundos.

A continuación, utilizamos el entorno de Matlab para diseñar el controlador de forma más sencilla. Para ello, definimos las matrices de estados en Matlab para discretizarlas e implementar el controlador. El proceso de discretización implica transformar las matrices de tiempo continuo en matrices de tiempo discreto, lo cual nos permitirá analizar los sistemas con herramientas estudiadas en Ingeniería de Control.

Posteriormente, llevamos a cabo un análisis de la controlabilidad de nuestro sistema, con el objetivo de determinar su capacidad para ser controlado mediante la fuerza y el par generados por las hélices. El rango de controlabilidad nos indica el número mínimo de entradas requeridas para llevar el estado inicial del sistema a cualquier otro estado en un tiempo finito. En nuestro caso, el rango de controlabilidad es 3.

Utilizando la dinámica elegida, realizamos el cálculo de la ubicación deseada de los polos, con el objetivo de obtener un sistema críticamente amortiguado que sea estable y proporcione una respuesta que alcance los valores de velocidad deseados sin presentar sobreoscilaciones.

Identificamos que el diseño del controlador para nuestro sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas requiere la determinación de 3 polos. Sin embargo, debido a que solo tenemos 2 entradas disponibles, no es posible establecer 3 polos idénticos en el sistema.

Procedimos seleccionando dos polos dominantes y un polo dominado, de modo que pudiéramos incluir todos los polos necesarios sin que interfieran con la dinámica del sistema. Los dos polos dominantes son los que tienen el mayor impacto en el controlador, ya que determinan la respuesta transitoria del sistema. Por otro lado, el polo dominado fue elegido 10 veces menor que los otros dos, asegurando de esta manera que no afecte el comportamiento del sistema de manera significativa.

Una pieza importante que se incluyó en esta parte del trabajo es un sensor de velocidad como el que se muestra en la Ilustración 24. Con este instrumento incorporado, tendremos mayor facilidad para la obtención de datos. De esta manera, también tendremos mayor precisión y exactitud de los valores de velocidad necesarios para realizar el modelo dinámico.



Ilustración 24: Sensor de velocidad del agua [8]

Debido a que los instrumentos de medición disponibles en el RoboBoat no permiten el control de las tres variables de velocidad, hemos planteado un regulador que nos permita controlar la velocidad en el eje  $X$  (a partir del sensor de velocidad) y la velocidad angular (a partir del IMU). Para la variable de velocidad en el eje  $Y$ , hemos propuesto utilizar un esquema de control con un observador que nos permita estimar dicha variable a partir de las anteriores variables, la fuerza de las hélices y el par de dirección. El objetivo es reconstruir todo el estado del barco cuando no es posible medir todas las variables de estado. A continuación, se presenta el diagrama de control descrito:

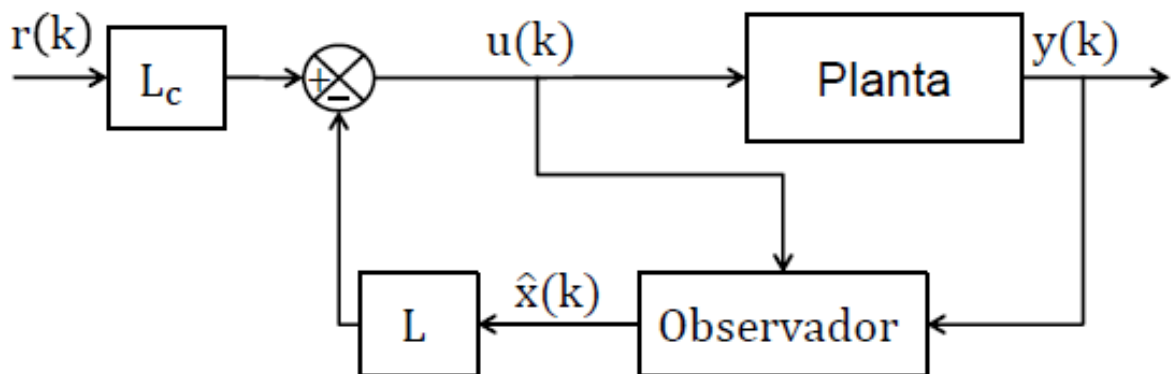


Ilustración 25: Esquema de control con observador por realimentación [9]

En la Ilustración 25 se muestra la representación gráfica de varios elementos.  $r(k)$  es el valor de referencia de  $v_{xref}$  y  $w_{zref}$ ,  $u(k)$  es la señal de control representada por la ecuación:  $u(k) = -L * x(k) + Lc * r(k)$ .

$y(k)$  es la salida del sistema, en nuestro caso la fuerza total  $f_p$  y el par generado por las hélices  $T_s$ .  $\hat{x}(k)$  es el estado estimado del sistema representado por  $v_x$ ,  $v_y$  y  $w_z$ .

La planta contiene el sistema dinámico, representado mediante tres ecuaciones diferenciales que deseamos controlar. Esta planta relaciona entre las variables de estado y entre las entradas del sistema con las salidas. Después, encontramos un observador, que nos permite predecir la variable no controlable de nuestro sistema. Por último, la ganancia del controlador  $L$ , se refiere a los valores del controlador por realimentación de estados y la ganancia de prealimentación  $Lc$ , a los valores aplicados directamente a la referencia deseada  $r(k)$ . Todo el controlador en función del instante de tiempo  $k$ .

Para calcular los puntos de equilibrio, necesitamos ser extremadamente precisos para que las derivadas de las ecuaciones sean exactamente cero. Por lo tanto, generamos un script en Matlab para encontrar estos valores y evitar que el controlador se dirija al infinito.

Para obtener los puntos de equilibrio, resolvemos el sistema de ecuaciones no lineales utilizando la función 'fsolve' que nos proporciona Matlab. Esta función nos permite alcanzar la precisión deseada.

En el **Anexo C.1** se encuentra el código que describe todo lo anterior y del cual se obtienen las próximas ilustraciones. Por otro lado, en el **Anexo C.2** encontramos el código del controlador.

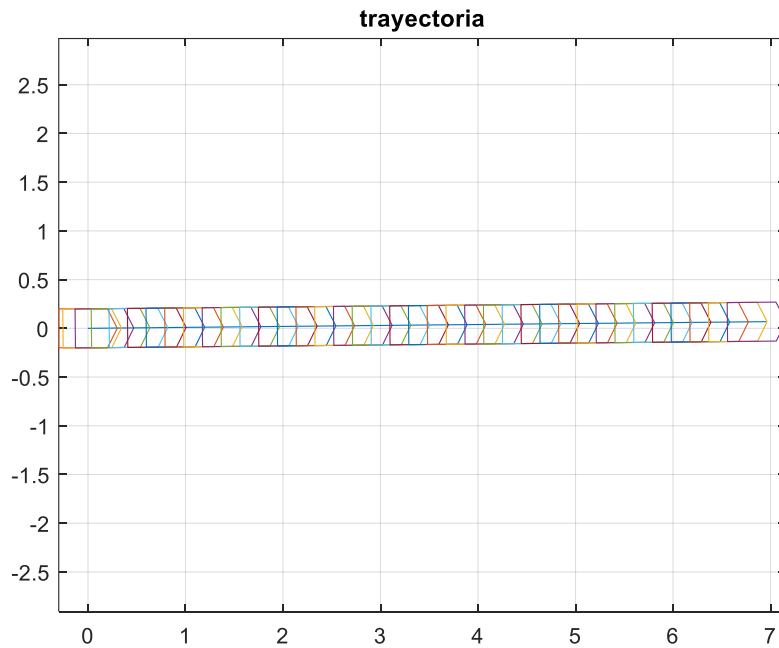
Para velocidades bajas del RoboBoat consideraremos los siguientes puntos de equilibrio:

- $v_x = 0.3132 \frac{m}{s}, v_y = 0.0 \frac{m}{s}, w_z = 0.0 \frac{rad}{s}$
- $f_p = 2.4178Nw, T_s = 0.0Nwm$

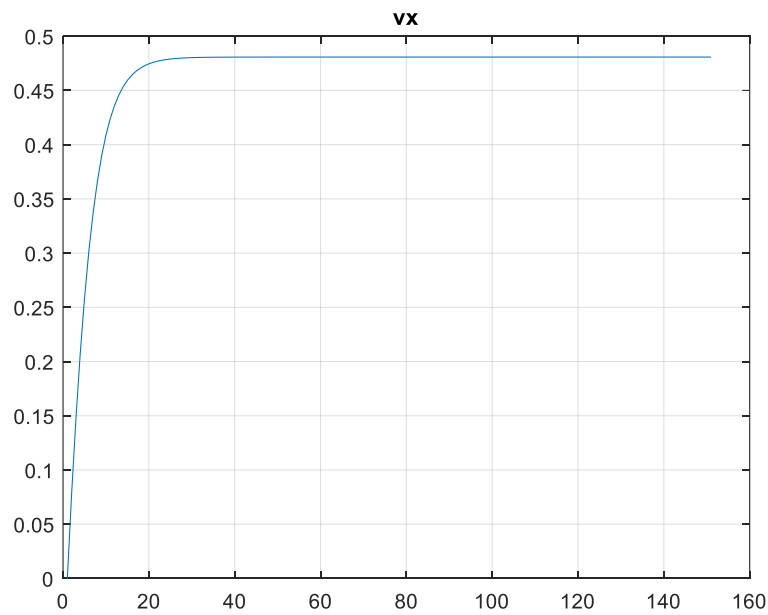
La representación matricial obtenida para este comportamiento del sistema es la siguiente:

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{v}_x \\ \Delta \dot{v}_y \\ \Delta \dot{w}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.7202 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & -0.1696 \\ 0.0 & -4.8634 & 0.0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta v_x \\ \Delta v_y \\ \Delta w_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.1095 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 2.0060 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta f_p \\ \Delta T_s \end{pmatrix}$$

Y la simulación de este caso se obtiene y se representa gráficamente en la siguiente ilustración:



*Ilustración 26: Trayectoria para comportamiento de velocidad baja*



*Ilustración 27: Velocidad en el eje X con un punto de equilibrio de 0.3132 m/s (Eje Y en décimas de segundos)*

En la Ilustración 27 se observa que los valores de velocidad permanecen muy próximos al punto de equilibrio establecido para el comportamiento en el que el RoboBoat navega a velocidades bajas. No tenemos sobreoscilación y el tiempo de respuesta cumple con nuestras especificaciones.

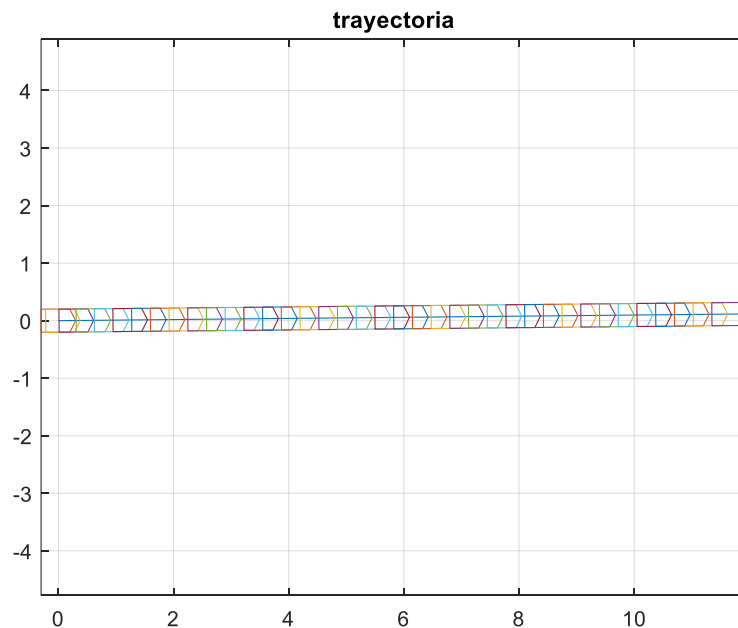
Para velocidades altas del RoboBoat consideraremos los siguientes puntos de equilibrio:

- $v_x = 0.7385 \frac{m}{s}, v_y = 0.0 \frac{m}{s}, w_z = 0.0 \frac{rad}{s}$
- $f_p = 7.1333 Nm, T_s = 0.0 Nm$

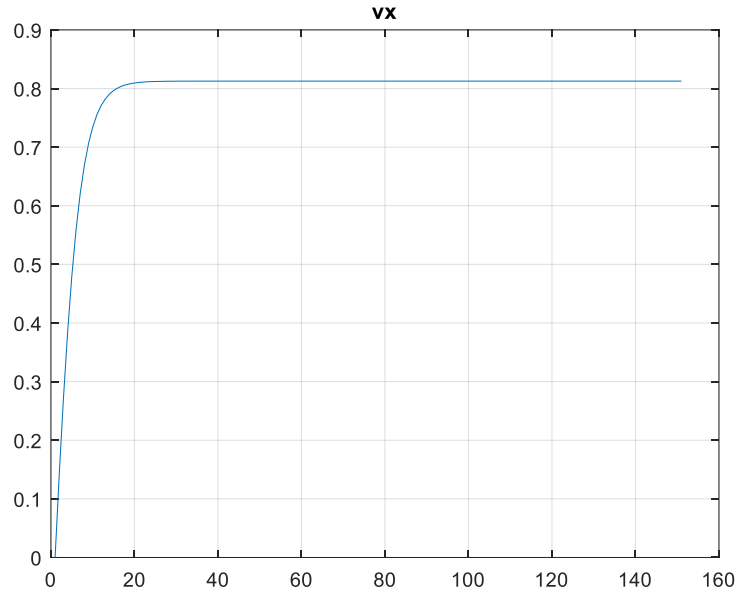
La representación matricial obtenida para este comportamiento del sistema es la siguiente:

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{v}_x \\ \Delta \dot{v}_y \\ \Delta \dot{w}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.0291 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & -0.2374 \\ 0.0 & -6.8017 & 0.0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta v_x \\ \Delta v_y \\ \Delta w_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.1095 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 2.0060 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta f_p \\ \Delta T_s \end{pmatrix}$$

Y la simulación de este caso se obtiene y se representa gráficamente en la siguiente ilustración:



*Ilustración 28: Trayectoria para comportamiento de velocidad alta*



*Ilustración 29: Velocidad en el eje X con un punto de equilibrio de 0.7385 m/s (Eje Y en décimas de segundos)*

En la Ilustración 29 se observa que los valores de velocidad permanecen muy próximos al punto de equilibrio establecido para el comportamiento en el que el RoboBoat navega a velocidades altas. Igual que en el comportamiento anterior, sin sobreoscilación y el tiempo de respuesta cumple con nuestras especificaciones.

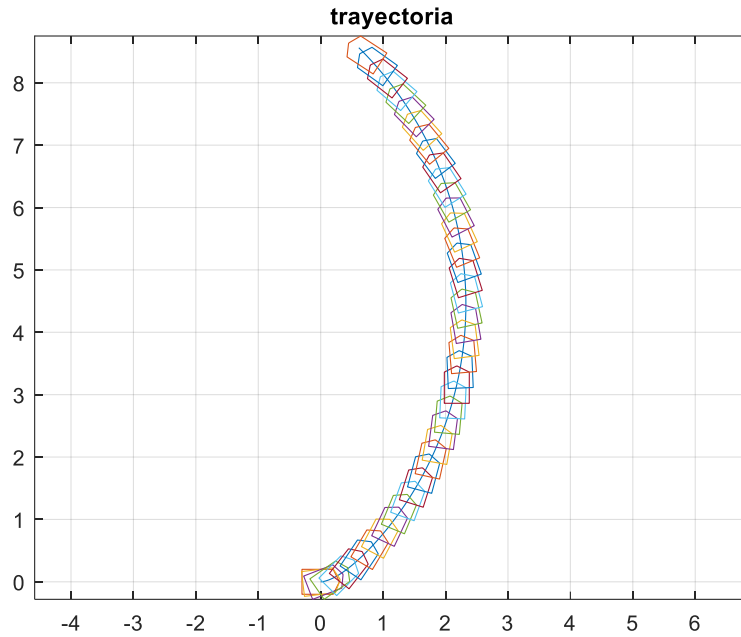
Para los giros suaves del RoboBoat consideraremos los siguientes puntos de equilibrio:

- $v_x = 0.3177 \frac{m}{s}, v_y = -0.0781 \frac{m}{s}, w_z = 0.0411 \frac{rad}{s}$
- $f_p = 3.6079 Nw, T_s = 0.5836 Nwm$

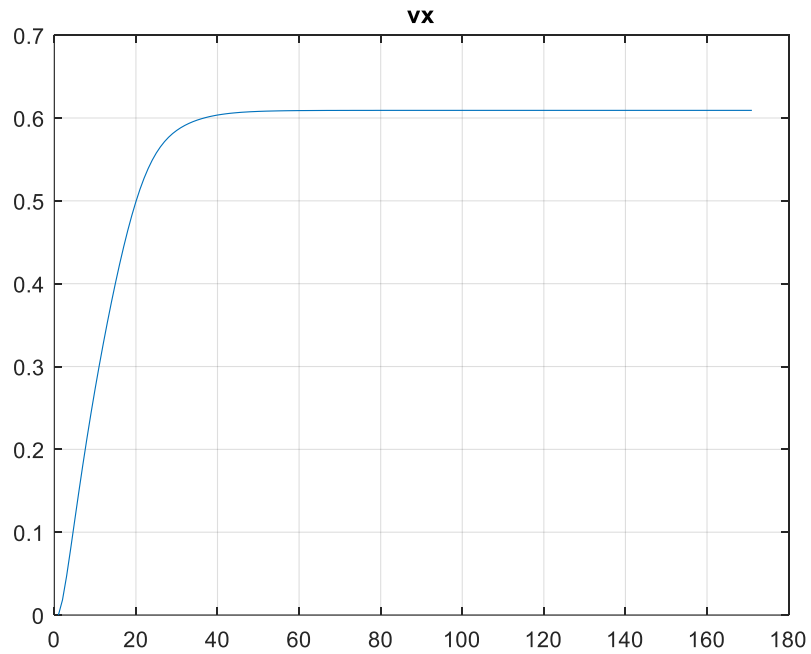
La representación matricial obtenida para este comportamiento del sistema es la siguiente:

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{v}_x \\ \Delta \dot{v}_y \\ \Delta \dot{w}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.7311 & -0.0759 & 0.1441 \\ 0.0223 & -0.2848 & -0.1720 \\ -1.2109 & -2.8204 & 0.0967 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta v_x \\ \Delta v_y \\ \Delta w_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.1095 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 2.0060 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta f_p \\ \Delta T_s \end{pmatrix}$$

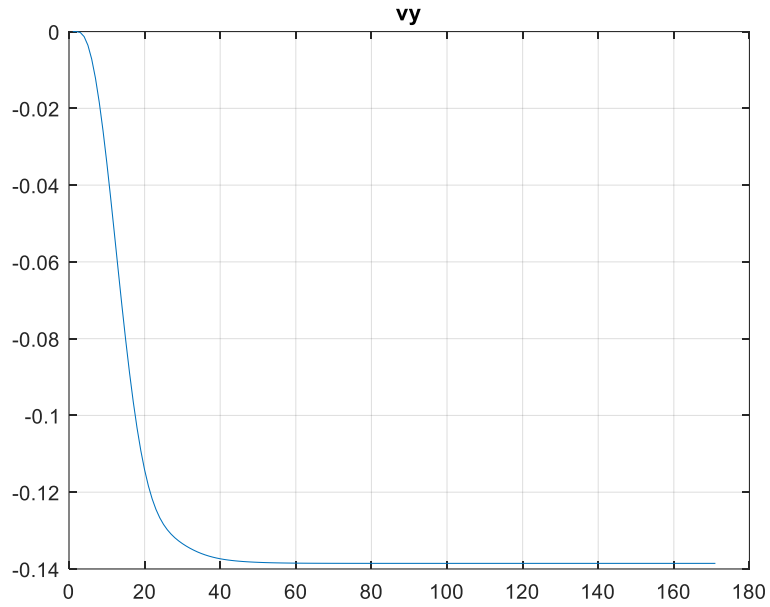
Y la simulación de este caso se obtiene y se representa gráficamente en la siguiente ilustración:



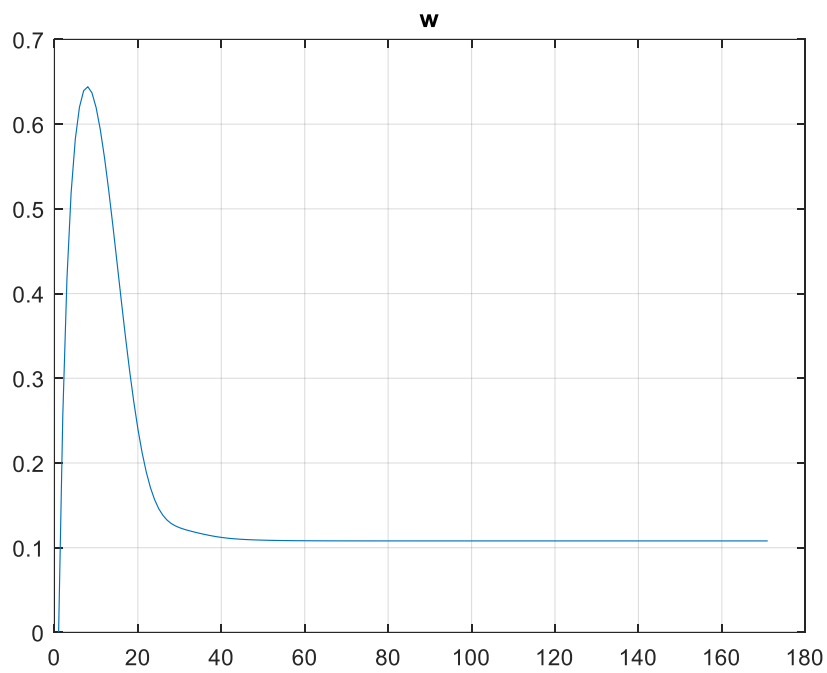
*Ilustración 30: Trayectoria para comportamiento de giro suave*



*Ilustración 31: Velocidad en el eje X con un punto de equilibrio de 0.3177 m/s (Eje Y en décimas de segundos)*



*Ilustración 32: Velocidad en el eje Y con un punto de equilibrio de -0.0781 m/s (Eje Y en décimas de segundos)*



*Ilustración 33: Velocidad angular con un punto de equilibrio de 0.0411 rad/s (Eje Y en décimas de segundos)*

En las Ilustraciones 31, 32 y 33 se observa que los valores de velocidad permanecen cerca de los puntos de equilibrio establecidos cuando el RoboBoat navega con un giro suave. Observamos únicamente sobreoscilación en la velocidad angular y el tiempo de respuesta cumple con nuestras especificaciones esperadas.

Para los giros bruscos del RoboBoat consideraremos los siguientes puntos de equilibrio:

- $v_x = 0.3511 \frac{m}{s}, v_y = -0.0865 \frac{m}{s}, w_z = 0.0424 \frac{rad}{s}$
- $f_p = 7.3507 Nw, T_s = 1.3333 Nwm$

La representación matricial obtenida para este comportamiento del sistema es la siguiente:

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{v}_x \\ \Delta \dot{v}_y \\ \Delta \dot{w}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.5365 & -0.3901 & 0.2258 \\ 0.1144 & -0.4841 & -0.1285 \\ -1.8972 & -0.3787 & 0.3979 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta v_x \\ \Delta v_y \\ \Delta w_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.1095 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 2.0060 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta f_p \\ \Delta T_s \end{pmatrix}$$

Y la simulación de este caso se obtiene y se representa gráficamente en la siguiente ilustración:

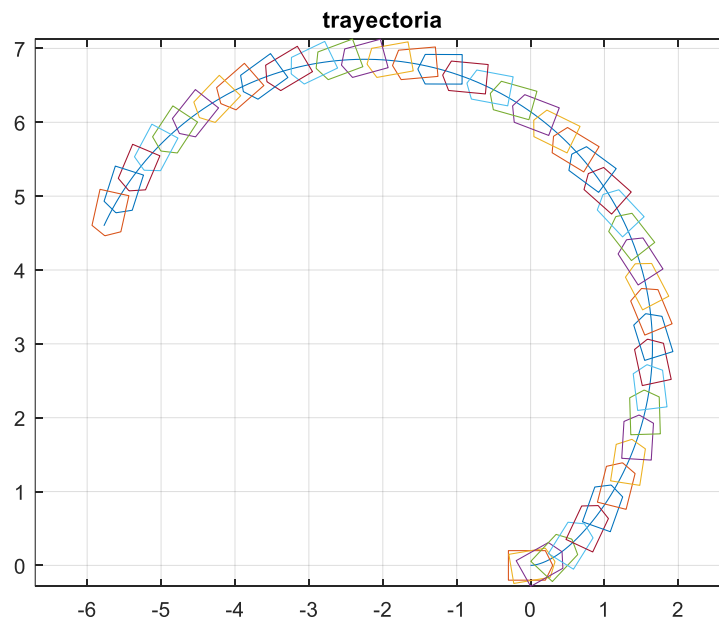
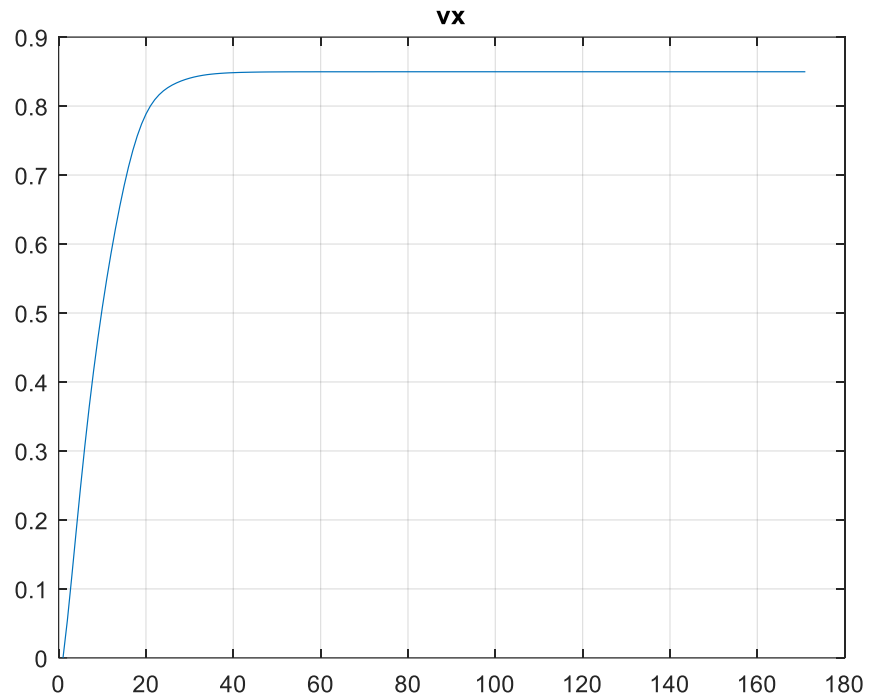
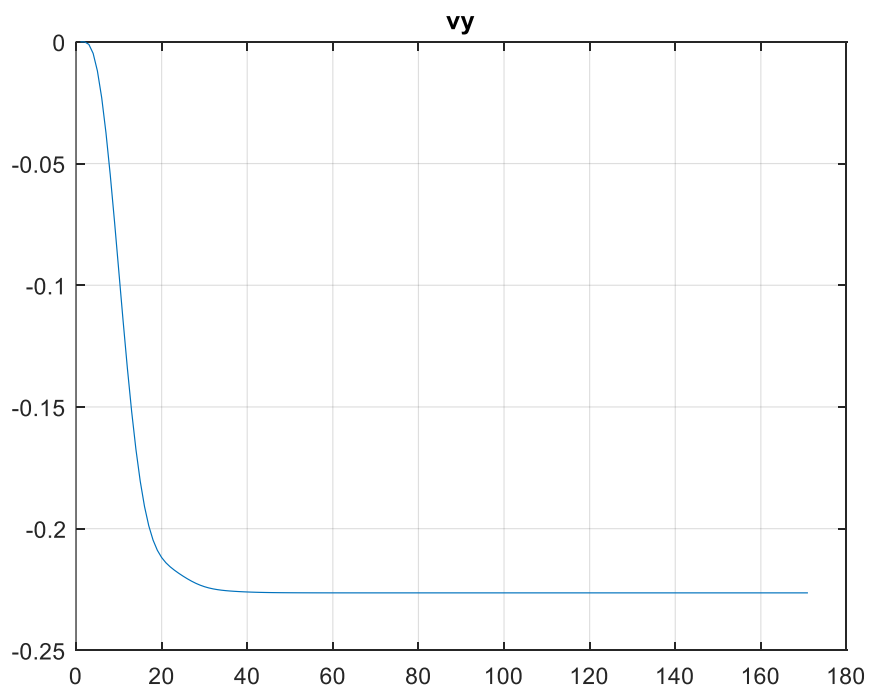


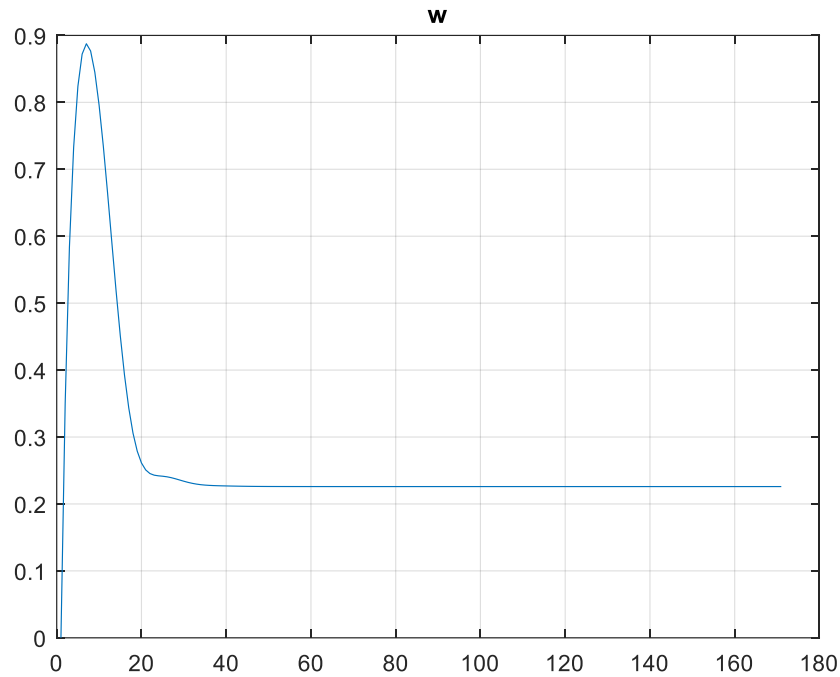
Ilustración 34: Trayectoria para comportamiento de giro brusco



*Ilustración 35: Velocidad en el eje X con un punto de equilibrio de 0.3511 m/s (Eje Y en décimas de segundos)*



*Ilustración 36: Velocidad en el eje Y con un punto de equilibrio de -0.0865 m/s (Eje Y en décimas de segundos)*



*Ilustración 37: Velocidad angular con un punto de equilibrio de 0.0424 m/s (Eje Y en décimas de segundos)*

En las Ilustraciones 35, 36 y 37 se observa que los valores de velocidad permanecen cerca de los puntos de equilibrio establecidos cuando el RoboBoat navega con un giro suave. Observamos únicamente sobreoscilación en la velocidad angular como el caso anterior y el tiempo de respuesta cumple con nuestras especificaciones esperadas.

Estos comportamientos no garantizan el control en el estado estacionario, por lo que, se propone como continuación de este TFG, el desarrollo un controlador integrador necesario para controlar el régimen permanente del sistema. Desarrollando un controlador integrador, se conseguirá mayor estabilidad en el sistema del RoboBoat.

# Capítulo 7

## Conclusiones y líneas futuras

En este proyecto se ha realizado la descripción de los componentes que lleva incorporados el RoboBoat. Se ha obtenido un modelo de tracción que establezca una relación directa entre las tensiones aplicadas a los bornes de los motores y las fuerzas y pares generados por las hélices.

Dado el escenario específico de navegación en aguas tranquilas, sin presencia de viento, corrientes u oleaje, se ha optado por utilizar un modelo dinámico simplificado en dos dimensiones (2D). Se han identificado tres términos de masa y seis coeficientes de amortiguamiento no lineales para dicho modelo dinámico.

Un análisis de disimetría en alguno de los ejes donde se ha añadido un término de par dependiente de  $v_y$  en el modelo dinámico.

Se ha desarrollado un simulador para imitar el comportamiento del sistema, llegando a la conclusión de que los dos modelos son válidos.

Por último, se han identificado cuatro comportamientos del RoboBoat para los cuales se ha diseñado un controlador con observador por realimentación que se han llevado a cabo en el simulador.

Debido a que no se han podido verificar estos comportamientos en el RoboBoat, se plantean la realización de pruebas experimentales para confirmar la validez del controlador. Además, se propone desarrollar un controlador más robusto, como por ejemplo la inclusión de un integrador para corregir el error acumulativo que pueda producirse con el controlador diseñado en este trabajo.

# Bibliografía

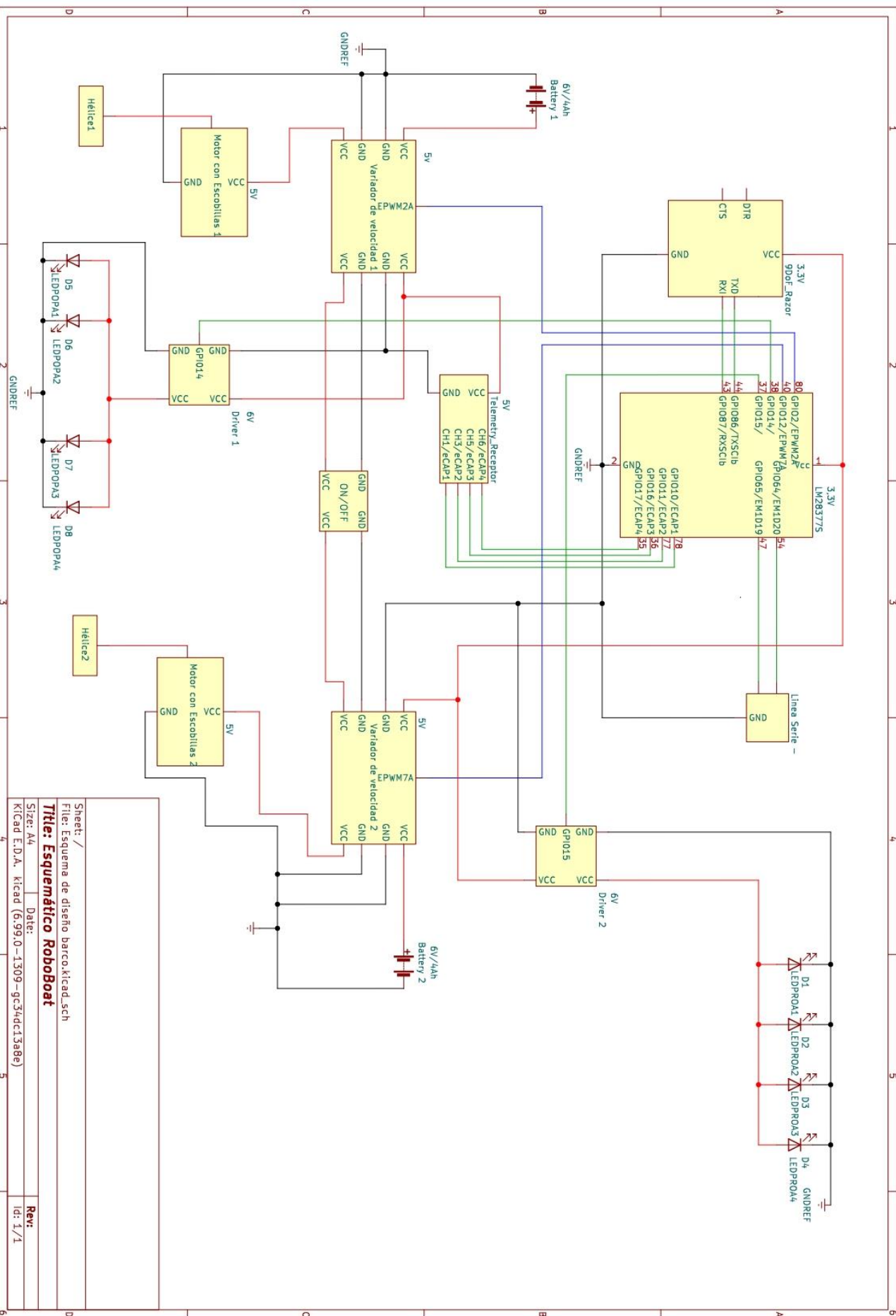
- [1] i. G. d. Robótica, «Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería de Aragón,» [En línea]. Available: <https://i3a.unizar.es/es/grupos-de-investigacion/roper.t>.
- [2] G. RoPERT, «Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería de Aragón,» [En línea]. Available: <https://i3a.unizar.es/es/actualidad/el-grupo-roper.t-oferta-dos-contratos-predoctorales>.
- [3] A. Medrano, «KiCad, Herramienta de Software Libre de Modelado de Circuitos Impresos para el Desarrollo de Hardware,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/5075/507555007010/html/>.
- [4] H. A. G. H. R. M. a. T. F. K. R. Muske, «“Identification of a control oriented nonlinear dynamic USV model”,» American Control Conference, 2008, pp. 562-567.
- [5] T. Fossen, «Guidance and Control of Ocean Vehicles,» Nueva York, 1994.
- [6] G. Montero, «Blog de Ingeniería Marítima,» 22 mayo 2017. [En línea]. Available: <https://ingenieriamaritima.wordpress.com/2017/05/22/masa-anadida-de-un-buque/>.
- [7] «Espacio de estados,» 2022. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Espacio\\_de\\_estados](https://es.wikipedia.org/wiki/Espacio_de_estados).
- [8] «Garmin,» [En línea]. Available: <https://www.garmin.com/en-US/p/102460>.
- [9] C. Sagües, «Observadores de estado y de las perturbaciones, Ingeniería de Control».
- [10] W. L. C. a. T. Kang, «Simultaneous Determination of Drag Coefficient and Added Mass,» IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2011.
- [11] L. D. K. B. a. H. A. F. Mahini, «“An experimental setup for autonomous operation of surface vessels in rough seas”,» 2013, pp. 703-715.
- [12] TexasInstruments, «TMS320x280x, 2801x, 2804x Enhanced Capture,» Noviembre 2004. [En línea]. Available: <https://www.ti.com/lit/ug/spru807b/spru807b.pdf?ts=1671637179331>.
- [13] paguayo, «Señales Tx y Rx,» 18 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://cursos.mcielectronics.cl/2019/06/18/senales-tx-y-rx/>.

# **ANEXOS**

## **ANEXO A: Esquemático de bloques estructurales de la electrónica del RoboBoat**

Este esquemático es una representación diseñada por elementos de un sistema electrónico utilizando símbolos y bloques estructurales en lugar de imágenes realistas. Normalmente, omite todos los detalles que no son de información relevante para intentar visualizar los elementos más esenciales.

El primer paso para tener un buen conocimiento del RoboBoat es realizar este esquemático donde se encuentran todos los conexiones que tiene el barco y está representado en la siguiente página:



Sheet: /  
 File: Esquema de diseño barco.kicad.sch  
**Title: Esquemático RoboBoat**  
 Size: A4  
 Date: / /  
 Kicad E.D.A. kicad (6:99.0-1309-gc3+dc13a8e)  
 Rev: /  
 Id: 1/1

## ANEXO B:

En estas tablas se representa la fuerza que ejerce cada hélice cuando se aplica un voltaje determinado para un dinamómetro de 1 Newtons y para otro de 5 Newtons.

<b>Adelante Hélice Derecha</b>			
<b>Voltaje para 1N (V)</b>	<b>Fuerza Hélice 1N (N)</b>	<b>Voltaje para 5N (V)</b>	<b>Fuerza Hélice 5N (N)</b>
0.26	0.02	0.4	0.3
0.28	0.06	0.42	0.5
0.3	0.15	0.44	0.65
0.32	0.22	0.46	0.7
0.34	0.28	0.48	1.0
0.36	0.41	0.5	1.2
0.38	0.56	0.52	1.4
0.4	0.64	0.54	1.52
-	-	0.56	1.64
-	-	0.58	2.0
-	-	0.6	2.3
-	-	0.62	2.3

*Tabla 5: Valores hacia Adelante de la Hélice Derecha*

<b>Adelante Hélice Izquierda</b>			
<b>Voltaje para 1N (V)</b>	<b>Fuerza Hélice 1N (N)</b>	<b>Voltaje para 5N (V)</b>	<b>Fuerza Hélice 5N (N)</b>
0.26	0.05	0.4	0.2
0.28	0.08	0.42	0.3
0.3	0.13	0.44	0.4
0.32	0.24	0.46	0.5
0.34	0.27	0.48	0.65
0.36	0.38	0.5	0.7
0.38	0.42	0.52	0.9
0.4	0.58	0.54	1.05
-	-	0.56	1.15
-	-	0.58	1.3
-	-	0.6	1.4
-	-	0.62	1.5

*Tabla 6: Valores hacia Adelante de la Hélice Izquierda*

<b>Atrás Hélices</b>			
<b>Voltaje para 1N (V)</b>	<b>Fuerza Hélice 1N (N)</b>	<b>Voltaje para 5N (V)</b>	<b>Fuerza Hélice 5N (N)</b>
-0.25	-0.1	-0.475	-0.7
-0.275	-0.2	-0.5	-1.0
-0.3	-0.25	-0.525	-1.0
-0.325	-0.35	-0.55	-1.1
-0.35	-0.4	-0.575	-1.3
-0.375	-0.52	-0.6	-1.5
-0.4	-0.55	-0.65	-1.6
-0.425	-0.68	-	-
-0.45	-0.85	-	-

*Tabla 7: Valores hacia Atrás de las dos Hélices*

# ANEXO C.1:

```
clear all ;

global m11 ;
global m22 ;
global m33 ;
global alpha1 ;
global alpha2 ;
global alpha3 ;
global d1 ;
global d2 ;
global d3 ;
global ds ;
global T ;
global b ;

m11 = 9.135 ;
m22 = 16.8681 ;
m33 = 0.4985 ;
alpha1 = 2.061 ;
alpha2 = 2.181 ;
alpha3 = 1.864 ;
d1 = 10.94 ;
d2 = 44.78 ;
d3 = 0.4077;
ds = 13.5 ;
T = 0.1 ;
b = 0.256 ;

Vxref = 0.9 ;
Wref = 0.3;

% Modelo espacio de estados para avance lineal Vx0 = 0.3132 m/s

global fp0 ;
global Ts0 ;

fp0 = 7.3507 ;
Ts0 = 1.3333 ;

% X0 = [0.3132 , 0.0 , -0.0] ; %VEL BAJA
% X0 = [0.7385 , 0.0 , 0.0] ; %VEL ALTA
% X0 = [0.3177 , -0.0781 , 0.0411] ; % GIRO SUAVE
X0 = [0.3511 , -0.0865 , 0.0424] ; % GIRO BRUSCO
func = @EQ_RB ;
X = fsolve (func, X0) ;

Vx0 = X(1) ;
Vy0 = X(2) ;
W0 = X(3);
```

```

A = [-d1*alpha1/m11*sign(Vx0)*abs(Vx0)^(alpha1-1)           m22/m11*W0
m22/m11*Vy0 ;
-m11/m22*W0           -d2*alpha2/m22*sign(Vy0)*abs(Vy0)^(alpha2-1)
-m11/m22*Vx0 ;
-(m22-m11)/m33*Vy0           -(m22-m11)/m33*Vx0+2*ds*Vy0
-d3*alpha3/m33*sign(W0)*abs(W0)^(alpha3-1)] ;

B = [1/m11    0 ;
      0       0 ;
      0     1/m33 ] ;

[F,G] = c2d(A,B,T);

% Controlador
z1 = 0.827;
z2 = 0.827;
z3 = 0.0827; % Multiplicidad no puede ser mayor que el número de entradas.
hay que poner un polo dominado
p = [z1, z2, z3];

global L ;
global Lc ;

L = place(F, G, p); % ley de realimentación del estado completo
Cxw=[1 0 0;0 0 1]; % Medida y control de variables vx-w
Lc=inv(Cxw*inv(eye(3)-F+G*L)*G);

% Estado RoboBoat

X_RB = [ 0.0 ; % x en ABS
         0.0 ; % y en ABS
         0.0 ; % tita en ABS
         0.0 ; % vx en RB
         0.0 ; % vy en RB
         0.0 ] ; % w

X_RB_t = X_RB ;
fp_t = 0.0 ;
Ts_t = 0.0 ;

for i = 1:170
    dtita = X_RB(6)*T ;
    dx = (X_RB(4)*cos(X_RB(3)+dtita/2) - X_RB(5)*sin(X_RB(3)+dtita/2))*T ;
    dy = (X_RB(5)*cos(X_RB(3)+dtita/2) + X_RB(4)*sin(X_RB(3)+dtita/2))*T ;
    X_RB(1) = X_RB(1) + dx ;
    X_RB(2) = X_RB(2) + dy ;
    X_RB(3) = X_RB(3) + dtita ;

    [dfp1, dTs1] = controller ((Vxref-Vx0), (Wref-W0), (X_RB(4)-
Vx0),(X_RB(5)-Vy0),(X_RB(6)-W0)) ;

    fp1 = dfp1 + fp0 ;
    Ts1 = dTs1 + Ts0 ;

    [X_RB(4) X_RB(5) X_RB(6)] = RoboBoat_din(fp1,Ts1,X_RB(4),X_RB(5),X_RB(6))
;

```

```

X_RB_t = [X_RB_t X_RB] ;
fp_t = [fp_t fp1] ;
Ts_t = [Ts_t Ts1] ;

end ;

figure (1) ;
plot (X_RB_t(4,:)) ;
title('vx')
grid ;

figure (2) ;
plot (X_RB_t(5,:)) ;
title('vy')
grid ;

figure (3) ;
plot (X_RB_t(6,:)) ;
title('w')
grid ;

figure (4) ;
plot (fp_t) ;
title('fp')
grid ;

figure (5) ;
plot (Ts_t) ;
title('Ts')
grid ;

figure (6) ;
plot (X_RB_t(1,:), X_RB_t(2,:)) ;
title('trayectoria')
grid ;
axis equal ;
hold on ;
for i=1:4:length(X_RB_t(1,:))
    PlotRob(X_RB_t(1,i), X_RB_t(2,i), X_RB_t(3,i)) ;
end ;
hold off ;

```

## ANEXO C.2:

```
function [fp1, Ts1] = controller (Vxref, Wref, vx,vy,w)

global L ;
global Lc ;

% CONTROL vx-w: control de velocidad de avance y rotación; vy adquiere
% valor del modelo. La vy no se controla, adquiere valor del modelo.

xk=[vx; vy; w]; % estado realimentado
rk=[Vxref;Wref]; % referencia

u= -L*xk + Lc*rk ; % accion

fp1 = u(1) ;
Ts1 = u(2) ;

end
```