



Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil Mecatrónica

Fabricación de un prototipo vehículo submarino e implementación de estrategia de control de posición

Profesor Guía: Roberto Ramírez A.
Profesor Co-Guía: Gonzalo Pincheira O.

José Contreras Aguirre
Curico-Chile
2021

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS' of the 'UNIVERSIDAD DE TALCA'. The right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO' of the 'UNIVERSIDAD DE TALCA'.

Curicó, 2022

**Fabricación de un prototipo vehículo
submarino e implementación de estrategia de
control de posición**

José Contreras Aguirre

Marzo, 2021
José Contreras Aguirre

Dedicatoria

A mi familia, a mi madre

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a los profesores Gonzalo Pincheira y Roberto Ramírez, quienes me apoyaron en este proyecto desde el inicio. Al profesor Gonzalo Pincheira, por haberme confiado su laboratorio y sus insumos, por enseñarme y guiarme en el proceso de fabricación con fibra de vidrio. Al profesor Roberto Ramírez por guiarme todos estos meses en el control de posición, por su dedicación al instruir y por el conocimiento que me aportó en este proceso. A ambos, les estoy muy agradecido.

A mi familia, mis abuelos, mis primos, quienes siempre me han brindado buena fortuna en mi vida y nunca han dejado de apoyarme.

A mi hermana Cecilia Contreras A., quien siempre estuvo para mí aún cuando no se lo pedí, por su amor incondicional, por sus buenas enseñanzas, por su apoyo en lo económico, por ser mi hermana, muchas gracias.

A mis padres José Contreras y Cecilia Aguirre, por apoyarme a lo largo de mi vida, por los buenos valores entregados, por tenerme paciencia en este proceso y porque nunca me ha faltado nada. Por sobre todo, a la luchadora de mi madre que siempre creyó en mí más de lo que yo lo hice en algún momento y me dio empujones para sumergirme en el abismo de la vida. Te estoy eternamente agradecido.

A Juan Antonio Serce, por brindarme siempre su apoyo durante estos años, enriquecerme de conocimiento y ser un padre más.

Por último, a mis amigos, a mis compañeros, quienes estuvieron conmigo a lo largo de este camino, en especial a Daniel Mella, Cesar Roa, Cristián Lang, con quienes viví los mejores años de mi vida universitaria, a Benjamín Saavedra, Brian Barrueto, Richard Arancibia, Jorge Correa, a quienes siempre les tendré consideración por el apoyo que nos brindamos y por la amistad que se generó. A Esteban Acevedo con quien forjé una gran amistad y siempre me ayudó con su conocimiento, sobre todo en este proceso. Sin ellos no hubiera sido lo mismo. Gracias por todo.

Resumen

En este documento se presenta el diseño-construcción de un prototipo de robot submarino sub-actuado y se implementa una estrategia de control desacoplando el sistema y separando el trabajo de los actuadores en dos esquemas; con uno se controla la posición en x , y , yaw y con el segundo el movimiento en z . Se utiliza control clásico PD para disminuir el error de posición en trayectoria durante el tiempo. Además, se expone el trabajo realizado para llegar a los objetivos propuestos en donde previamente se genera una etapa de investigación y de simulación para el diseño del vehículo en CAD, simulación de fuerzas de arrastre en ANSYS, para luego pasar a una etapa de fabricación de este. Finalmente se realiza una estrategia de control y se verifica a través de simulación en Matlab-Simulink.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Introducción General	1
1.2	Estado del Arte	1
1.2.1	Tipos de robots submarinos	2
1.2.2	Tipos de propulsores	4
1.2.3	Tipos de materiales y geometrías utilizadas en la fabricación	9
1.2.4	Fuentes de energía	11
1.2.5	Sensores	13
1.2.6	Técnicas de control	15
1.3	Discusiones bibliográficas	21
1.4	Objetivos	23
1.4.1	Objetivo General	23
1.4.2	Objetivos Específicos	23
1.5	Alcances y Limitaciones	23
1.5.1	Alcances	23
1.5.2	Limitaciones	23
1.6	Metodología	24
1.6.1	Análisis del modelo matemático de un vehículo submarino	24
1.6.2	Dimensionamiento de empuje y potencia requerida	24
1.6.3	Diseño en CAD y fabricación	24
1.6.4	Integración de componentes electrónicos	24
1.6.5	Simulación de la Estrategia de Control	24
2	Sistema de propulsión	25
2.1	Empuje y potencia requerida	25
2.1.1	Empuje	25
2.1.2	Potencia requerida	27
2.2	Diseño hélice	29
2.3	Diseño sistema propulsor	36
2.4	Diseño de timón	37
2.5	Tipos de timones	37
2.6	Selección timón	38
2.7	Diseño timón	38
2.8	Ensamble sistema timón	40
3	Diseño y fabricación de la estructura	43
3.1	Diseño en CAD	43
3.2	Fabricación de molde	44
3.3	Proceso de fabricación: Infusión al vacío con fibra de vidrio y resina	46
3.4	Fabricación de carcasa	48
3.5	Mecanizado de carcasa	50
3.6	Encamisado agujeros de carcasa	51
3.7	Impresión 3D piezas	52
3.8	Ensamble	53

3.9	Sellado y permeabilidad	54
3.9.1	Sellado entre carcásas	55
3.9.2	Sellado carcása-encamisado	56
3.9.3	Sellado cableado-interior	57
4	Componentes y dispositivos electrónicos	58
4.1	Dispositivo de control	58
4.2	Drivers motor	59
4.3	Sensor	60
4.4	Conector impermeable interior-exterior	61
4.5	Alimentación	62
4.5.1	Consumo eléctrico	62
4.5.2	Selección de batería	63
4.6	Conexión e integración	65
5	Modelamiento de un vehículo submarino	69
5.1	Introducción	69
5.2	Marco teórico	69
5.2.1	Marcos de referencia	69
5.2.2	Flotación	70
5.3	Modelado del sistema	71
5.3.1	Modelado cinemático de robots submarinos	71
5.3.2	Modelado dinámico de robots submarinos	72
5.3.3	Fuerzas inerciales	73
5.3.4	Fuerzas hidrodinámicas	75
5.3.5	Fuerzas de restitución	76
5.3.6	Fuerzas de propulsión	77
5.4	Discusión y Conclusiones	80
6	Control de posición	81
6.1	Variables del vehículo	81
6.2	Identificación del problema de control	85
6.3	Estrategia de control	86
6.3.1	Consideraciones y suposiciones para simplificar el sistema	87
6.3.2	Esquema de Control	88
6.3.3	Simulaciones	88
6.4	Discusión de resultados	93
7	Conclusiones	94
7.1	Introducción	94
7.2	Sumario	94
7.3	Conclusiones	94
7.4	Trabajos futuros	95
	Referencias	96
	Anexos	102

Anexos	102
A Planos de diseño del prototipo	102
A.1 Plano vista explosionada	102
A.2 Plano de carcasa	103
A.3 Plano de cola	104
A.4 Plano de soporte motor	105
A.5 Plano de soporte motor de cola	106
A.6 Plano de hélice	107
A.7 Plano de timón	108
A.8 Plano acople servo-piñon	109
B Especificaciones de dispositivos electrónicos	110
B.1 Conector SP28-6S	110
B.2 Especificaciones motor brushless	111
B.3 Especificaciones controlador motor brushless	112
B.4 Sensor MPU6050	113
B.5 Servo-motor FreeTech	114
C Planos de conexión	115
C.1 Plano de conexión pin a pin	115
D Simulaciones en Ansys	116
D.1 procedimiento en Workbech	116
D.2 Gráficas de fuerza de arrastre	125
D.3 Código para obtención de gráficas de fuerza de arrastre en Matlab	125
E Obtención de parámetros en SolidWorks	127
F Simulación de control	128
F.1 Bloques de control en Simulink	128
F.2 Código de seguimiento de referencias	130

Índice de figuras

1.1	clasificación de robots submarinos. Fuente: [1]	3
1.2	sistemas de propulsión hélice. a) ODIN-III (múltiples propulsores) [2]. b) REMO (impulsores vectoriales) [3].	5
1.3	sistemas de propulsión planeador. a) MarIam [4]. b) Slocum [5].	6
1.4	sistemas de propulsión Bio-Inspirados. a) SEPIOS,SQUIDBOT [6]. b) Robotic Dolphin [7]	7
1.5	vehículo submarino AUV a propulsión con inyección. Fuente: [8].	7
1.6	materiales usados en la fabricación de la cabina en AUVs. Fuente: [9].	10
1.7	geometrías utilizadas en cabinas de AUV's. Fuente: [9].	11
1.8	esquema de control PD propuesto para ROV ROSUB6000. Fuente: [10]	17
1.9	diagrama de bloque para control PID. Fuente: [11]	18
1.10	diagrama de bloque para un controlador HRN. Fuente: [12]	19
1.11	diagrama de bloque del SMC óptimo basado en el tiempo de una red neuronal para el control de Pitch y Yaw con una acción de control suave. Fuente: [13]	21
2.1	área proyectada de vehículo submarino y vista superior.	25
2.2	área proyectada de vehículo submarino y vista frontal.	26
2.3	volumen de control hélice. Fuente: [14]	27
2.4	geometría básica de series Ka . Fuente: [15]	31
2.5	gráfica de pruebas de serie Ka 3-65 para hélice con tobera N°19. Fuente: [16].	32
2.6	modelo usado para simulación en ANSYS.	35
2.7	detalles dimensionales de hélices serie Ka . Fuente: [15].	36
2.8	sección tobera N°19. Fuente: [15]	36
2.9	ensamble sistema de propulsión motor-hélice. a) vista lateral, b) vista isométrica, c) vista superior.	37
2.10	clasificación de tipos de timón. Fuente: [17]	37
2.11	a) spade rudder. b) full skeg rudder. Fuente: [17]	38
2.12	forma de perfil NACA. Fuente: [17]	39
2.13	diseño de timón realizado en CAD. a) vista isométrica, b) vista superior, c) vista lateral.	40
2.14	Servomotor FreeTech FS5106B. Fuente: [18]	40
2.15	Sistema de timón.	41
2.16	sistema de timón con vista explosionada.	41
3.1	a) diseño inicial propuesto. b) ensamble inicial del diseño propuesto	43
3.2	a) comparación mecanizado entre buen y mal resultado. b) partes obtenidas a partir de CNC. c) unión de partes. d) aplicación de masilla y ensanchamiento de molde.	44
3.3	a) suavizado superficie y primeras capas de cera. b) molde con capa de cera pulida. c) primera aplicación de tela de fibra de vidrio. d) aplicación de fibra de vidrio y resina.	45
3.4	a) molde de fibra de vidrio. b) cara útil del molde de fibra de vidrio.	46
3.5	proceso de infusión por vacío. Fuente: [19].	47
3.6	vista seccionada de proceso general de infusión por vacío.	47
3.7	vista seccionada de proceso de infusión al vacío a implementar.	48

3.8	a) capas de fibra de vidrio, peel ply y malla. b) vista cercana lateral de las capas de material en el molde. c) vista lejana lateral de las capas de material en el molde.	48
3.9	a) adhesión de mangueras, conexión T y peel ply al molde. b) vista cercana de la adhesión de algunos insumos al molde mediante el pegote.	49
3.10	a) instalación de bolsa de vacío y prueba de vacío. b) conexión de manguera de vinilo a conector tipo T para la inyección de resina al molde. c) inyección de resina al vacío. d) vista cercana de inyección de resina al vacío.	49
3.11	a) compresor utilizado para generar vacío. b) acumulador de succión.	50
3.12	a) carcasa de fibra de vidrio. b) carcasas simétricas.	50
3.13	a) mecanizado de pestañas en carcasas. b) vista isométrica de carcasas.	51
3.14	comparación de agujeros.	51
3.15	a) deformación de tubos PVC. b) encamisado de carcasas con tubos PVC (vista frontal). c) encamisado de carcasas con tubos PVC (vista lateral).	52
3.16	a) rediseño de prototipo. b) rediseño de prototipo junto con el sistema de timón.	52
3.17	piezas de impresión 3D.a) acople cola. b) aleta de timón. c) caja servomotor. d) cola. e) extensión brazo servo. f) guía de soporte servomotor. g) hélice. h) soporte para motor vertical. i) soporte para motor cola. j) soporte servomotor k) tapa de caja servomotor.	53
3.18	a) conjunto de piezas a ensamblar. b) configuración de encamisado y soporte motor. c) ensamble de hélice-motor. d) ensamble del soporte motor a la cola, motor y hélice.	54
3.19	a) piezas impresas 3D para transmisión de movimiento timón. b) piezas impresas 3D para el acople de timón en cola. c) sistema de timón acoplado en cola.	54
3.20	a) junta entre carcasa. b) junta entre carcasa y encamisado. c) pasaje entre cableado de motores e interior estructura.	55
3.21	a) empaquetadura a utilizar en el sellado entre carcasas. b) adhesivo Agorex usado en el pegado de junta y carcasa. c) perfil de carcasa sobre el cual se trabaja la junta.	55
3.22	a) vista isométrica implementación junta. b) vista superior implementación junta.	56
3.23	a) vista posterior junta implementada. b) vista posterior en esquina junta implementada. c) vista lateral junta implementada. d) vista superior junta implementada.	56
3.24	a) vista interior sellado. b) vista exterior sellado.	57
3.25	sellado interior de cables.	57
4.1	Arduino DUE. Fuente: [20]	58
4.2	a) controlador motor brushless tipo tarjeta [21] . b) ESC con inversor de giro [22].	60
4.3	MPU 6050. Fuente: [23]	61
4.4	conector resistente al agua modelo SP28-6S. Fuente: [24]	61
4.5	a) batería Li-ion 18650 [25]. b) banco de baterías Li-ion.	63
4.6	batería Lipo Reedy Wolfpack Gen2 3S. Fuente: [26]	64
4.7	bloques de conexión.	65

4.8	esquema de conexión Motor-Driver-Arduino.	66
4.9	esquema de conexión Arduino-IMU, servomotor.	66
4.10	integración de componentes electrónicos y otros elementos.	67
4.11	vista explosionada - conjunto de motores y hélices.	68
4.12	vista explosionada - elementos de cola.	68
5.1	marcos de referencia para describir el movimiento del vehículo.	69
5.2	fuerzas de flotación.	70
6.1	marcos de referencia.	81
6.2	vista superior, identificación actuadores, yaw, ángulo timón.	82
6.3	vista lateral, identificación de actuadores y velocidades lineales.	82
6.4	vista isométrica, fuerzas y momentos.	83
6.5	vista frontal, fuerzas y momentos.	83
6.6	esquema general de control.	86
6.7	visualización de plano X-Y y parámetros.	87
6.8	esquema de control para el sistema desacoplado de X-Y-Yaw.	88
6.9	esquema de control para el sistema desacoplado de Z.	89
6.10	simulación de control de posición en el plano X-Y, con referencia en X = 15 , Y = 15.	90
6.11	simulación de control de posición Z, con referencia en z = -5.	90
6.12	control de trayectoria por puntos en plano X-Y con $K_p=200$	91
6.13	control de trayectoria por puntos en plano X-Y con $K_p=1000$	92
D.1	creación de proyecto en Ansys.	116
D.2	vista de geometría importada junto con enclosure.	117
D.3	árbol de trabajo de Design Modeler.	117
D.4	árbol de trabajo de entorno Mesh.	118
D.5	vista de sólidos con generación de Mesh aplicada.	118
D.6	árbol de trabajo donde se insertan métodos.	119
D.7	aplicación de un método a un cuerpo.	119
D.8	árbol de trabajo en Mesh donde se insertan Selecciones nombradas.	119
D.9	vista de Inlet.	120
D.10	vista de Outlet.	120
D.11	árbol de trabajo de entorno Setup.	121
D.12	opciones de límites de condiciones.	122
D.13	declaración de reporte de variables.	122
D.14	ventana de inicialización de soluciones.	123
D.15	ventana comenzar el cálculo.	123
D.16	gráfico Fuerza arrastre - Iteraciones (yaw).	124
D.17	visualización de resultados obtenidos en yaw.	124
D.18	gráficas obtenidas de las fuerzas de arrastre en X, Y, Z, Yaw, para el proto- tipo diseñado.	125
E.1	variables obtenidas del ensamble en SolidWorks.	127
F.1	esquema de control de posición en Simulink.	128
F.2	bloque de cálculo de ángulo.	129
F.3	bloque de cálculo velocidad de referencia.	129
F.4	bloque de cálculo velocidad actual.	129
F.5	bloque de ponderación señal de motores.	129

Índice de tablas

1.1	ventaja y desventaja entre tipos de autonomía.	3
1.2	ventaja y desventaja entre tipos de misiones.	4
1.3	ventaja y desventaja en los tipos de propulsores.	8
1.4	materiales para cabinas de vehículos submarinos. Fuente: [27]	10
1.5	resumen de características de baterías usadas comunmente. Fuente: [28].	12
1.6	ventajas y desventajas de baterías en vehículos submarinos. Fuente: [28].	13
1.7	arquitecturas de Control.	16
1.8	ventajas y desventajas de tipos de técnica de control.	21
2.1	cálculos obtenidos para potencia requerida en X	29
2.2	resultados para hélices en Z	34
2.3	empujes obtenidos en la dirección de Z	35
2.4	elementos de sistema timón.	42
4.1	comparación de características entre placas Arduino disponibles para el proyecto.	59
4.2	características controladores motor brushless . Fuente: [21] [22]	60
4.3	corriente permitida de dispositivos.	62
4.4	comparación de baterías.	63
4.5	comparación de baterías.	64
4.6	comparación precios y configuración de batería.	64
4.7	elementos de electrónica y otros elementos.	67
5.1	notación de movimiento de vehículos marinos. Fuente: [29].	70
5.2	coeficientes de arrastre obtenidos en ANSYS.	76
6.1	resumen de parámetros y variables.	84
6.2	parámetros y coeficientes del vehículo.	85
6.3	datos utilizados en la simulación de objetivo en plano X-Y.	89
6.4	datos utilizados en la simulación para alcance de objetivo en Z	90
6.5	datos utilizados para simulación de trayectoria en el plano X-Y con $K_p = 200$	91
6.6	datos utilizados para simulación de trayectoria en el plano X-Y con $K_p = 1000$	92
B.1	especificaciones servomotor.	114
D.1	datos obtenidos de simulaciones en ANSYS para fuerzas de arrastre.	125

1. Introducción

1.1. Introducción General

Los robots submarinos se utilizan principalmente en tareas que son de difícil maniobra o acceso para el ser humano, donde además suplir estas tareas como en el mantenimiento de refinerías pueden significar una disminución considerable en la salud del hombre. Este ejemplo es una de tantas áreas de trabajo que puede beneficiar la robótica submarina, como la exploración, análisis de minas submarinas, construcción de estructuras subacuáticas, trabajos de enjambre submarino, optimización en la acuicultura, etc.

Este proyecto busca satisfacer una problemática en cuanto la investigación de control de posicionamiento de vehículos sumergibles, pero además y específicamente, enfocado a un prototipo que se diseña y se fabrica en este proyecto, considerando estos tópicos como parte de la investigación. En cuanto a la revisión bibliográfica que se hace, existen diversas estrategias de control estudiadas y una mayoría queda en simulaciones debido a lo complejo que es la obtención de algunos parámetros, esto en cuanto a la inversión de tiempo y/o recursos como laboratorios.

El proyecto consiste en diseñar un prototipo de vehículo submarino, para luego pasar a una etapa de fabricación de este y finalmente obtener parámetros del modelo que se implementan en un algoritmo de control de posición. Este vehículo es propulsado por 3 impulsores de hélice y cuenta con un timón para virar comandado por un servomotor. Los dispositivos y materiales utilizados en este proyecto están limitados a la disponibilidad de estos en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca.

Este documento abarca 7 capítulos, donde en el primero se realiza un estado del arte de la robótica submarina, luego en el capítulo 2 se estima mediante una memoria de cálculo el empuje y potencia necesaria del sistema. En el capítulo 3 se presenta el desarrollo del diseño en CAD y posteriormente la fabricación de la estructura del vehículo. Luego, en el capítulo 4 se describen los componentes de electrónica a utilizar, se propone una fuente de alimentación y se explica como estos están interconectados entre sí, demostrando una integración de estos equipos. En el capítulo 5 se presenta un marco teórico y ecuaciones que describen el sistema para posteriormente en el capítulo 6 presentar la propuesta de control de posición en donde se muestran gráficos del comportamiento del dispositivo. Finalmente, en el capítulo 7 se concluye el documento presentando además trabajos futuros.

1.2. Estado del Arte

A continuación, se realiza una revisión bibliográfica abarcando los tipos de vehículos submarinos y como estos se clasifican, las distintas geometrías y materiales que se utilizan en su fabricación, distintos tipos de propulsores que se implementan, fuentes de energías, sensores que se usan en estos sistemas y por último técnicas de control que se aplican a los vehículos submarinos. Esta revisión se realiza para definir el diseño del robot y posteriormente implementar una estrategia de control en la trayectoria y posición del móvil.

1.2.1. Tipos de robots submarinos

Los robots submarinos se clasifican principalmente por su nivel de autonomía. Existen robots completamente autónomos y otros que deben ser controlados continuamente por un operador. Esto permite definir la siguiente clasificación:

- AUVs (Autonomous Underwater Vehicle): Son aquellos dispositivos que se desplazan bajo el agua sin necesidad de ser manejados por un operador a bordo. Posee el mayor nivel de autonomía dentro de las 3 clasificaciones [30].
- ROVs (Remote Operated Vehicle): Pertenecen a los robots submarinos no-autónomos, controlados y alimentados desde la superficie por un operador/piloto a través de un umbilical o cable [31].
- IAUVs (Intermediate Autonomous Underwater Vehicle): Estos dispositivos pueden considerarse actualmente en un nivel intermedio de autonomía, ya que los prototipos desarrollados hasta ahora requieren de un control supervisado o de un operador que realice la tarea de razonamiento para determinar las acciones que se deben llevar a cabo para completar una misión [32].

Además, los robots submarinos pueden clasificarse por el tipo de misión a realizar. Estas pueden ser de inspección o manipulación. La diferencia radica en que el segundo necesita de alguna herramienta para intervenir, ya sea un brazo, pinzas, etc. También, la misión define los tipos de sensores, actuadores y estructura que el robot debe poseer.

Por otro lado, existen otros conceptos para clasificar a los vehículos submarinos como es el sistema de propulsión, que definirá los movimientos y grados de libertad que el robot pueda realizar. Los principales tipos de propulsión que se implementan son los Impulsores de Hélice, Planeadores (basados en lastre y aletas) y los Bio-Inspirados. Existen otros no tan investigados a diferencia de los anteriormente mencionados, como son los basados en Inyección de Agua y los Magnetohidrodinámicos [1].

En la figura 1.1 se presenta un esquema conceptual de la clasificación de robots submarinos.

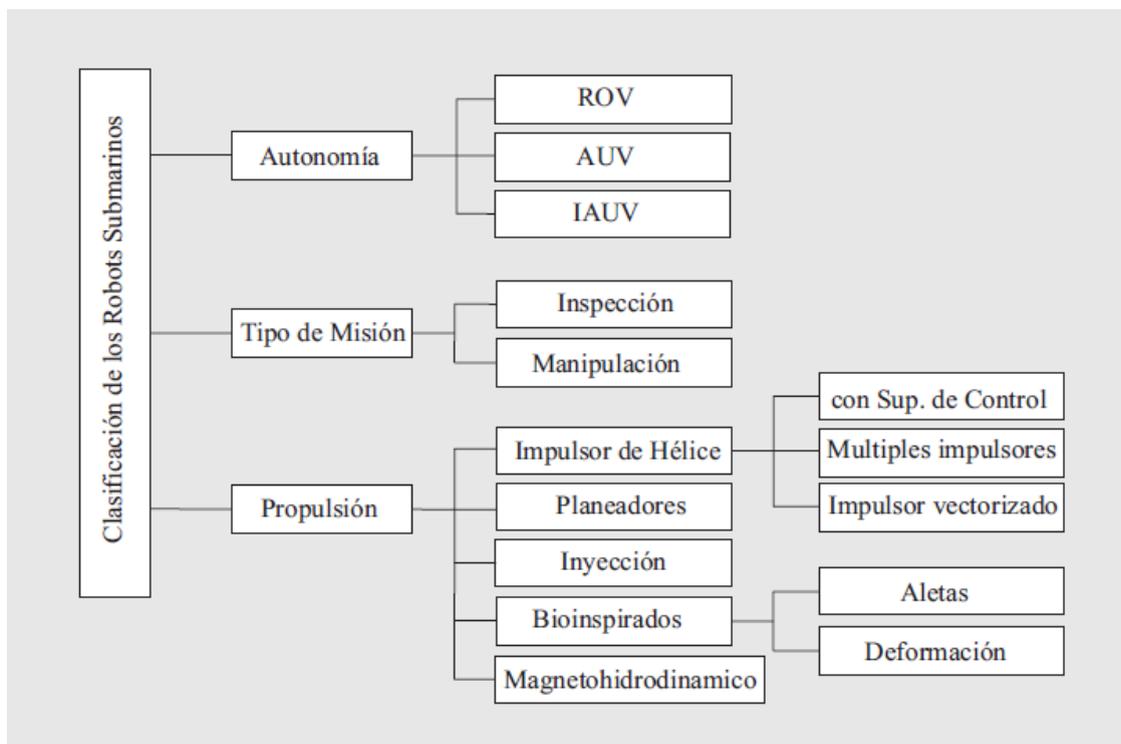


Fig. 1.1: clasificación de robots submarinos. Fuente: [1]

En las tablas 1.1 y 1.2 se señalan las ventajas y desventajas en autonomía y misión respectivamente.

Tabla 1.1: ventaja y desventaja entre tipos de autonomía.

Autonomía	Ventajas	Desventajas
ROV	<ul style="list-style-type: none"> · Posee una fuente energética externa a la cabina del vehículo. · Se conoce el volumen de trabajo 	<ul style="list-style-type: none"> · Consume mayor cantidad de energía, debido a la cantidad de uso de motores. · El umbilical de comunicación podría limitar la maniobra del robot.
AUV	<ul style="list-style-type: none"> · No posee un cable de comunicación que limite su volumen de trabajo. · No depende de un piloto remoto para realizar funciones o misiones. 	<ul style="list-style-type: none"> · En espacios reducidos su maniobrabilidad no suele ser muy precisa. · La comunicación es más compleja que en un ROV.
IAUV	<ul style="list-style-type: none"> · No depende de un cable de comunicaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> · A diferencia de un AUV, la misión a realizar debe ser supervisada.

Tabla 1.2: ventaja y desventaja entre tipos de misiones.

Misión	Ventajas	Desventajas
Inspección	<ul style="list-style-type: none"> · Menos costoso y complejo que el de manipulación. · Se adapta a diversas misiones. 	<ul style="list-style-type: none"> · Se requiere invertir en un sistema de visión con algoritmos de resolución en agua, debido a la gran cantidad de partículas en suspensión que dificulta la calidad de imagen.
Manipulación	<ul style="list-style-type: none"> · Su función es específica para cada misión. Lo cual acota el diseño. · Además de manipular puede inspeccionar. 	<ul style="list-style-type: none"> · Más costoso, pues se necesita sistema de visión y brazo (manipulador) o herramienta para manipular. · La herramienta para manipular debe ser precisa, de lo contrario puede arruinar la misión e inclusive dañar al robot.

1.2.2. Tipos de propulsores

La importancia del sistema de propulsión radica en que es el encargado de generar las fuerzas o empujes necesarios para desplazar al vehículo en distintas direcciones. Dependiendo del tipo de propulsor, se puede cambiar la dirección de este empuje, ya sea por la distribución de múltiples del mismo o por la variación de su orientación.

Para el diseño del robot submarino es necesario definir cuál será el tipo de propulsión a implementar. Con lo cual, se revisa cada uno de los mostrados en la figura 1.1; impulsores de hélice, planeador acuático, bio-inspirados, inyección y magnetohidrodinámicos, para luego presentar las ventajas y desventajas de estos en tabla 1.3.

1. Impulsores de hélice

Este es el tipo de propulsión más usado [33], el cual consiste en un motor eléctrico con una hélice acoplada a este. Al hacer girar la hélice produce un efecto de empuje al desplazar el fluido de adelante hacia atrás, debido a la diferencia de presión producida.

En general, se utiliza un modelo matemático sencillo del impulsor en el cual la fuerza del impulsor es proporcional al cuadrado de la velocidad angular de la hélice, y a su vez esta velocidad es proporcional al voltaje del motor [34].

Existen distintas combinaciones en el uso de impulsores de hélice, ya sean por su distribución espacial respecto el robot o la combinación con otros sistemas, como los

impulsores-superficies de control y el uso de múltiples impulsores. Los primeros combinan la propulsión de hélice con aletas con un grado de libertad para obtener movimientos de cabeceo, viraje y balanceo, es un sistema simple pero de maniobrabilidad muy reducida. Por otra parte, los múltiples impulsores consisten en ubicar un número determinado de impulsores con el fin de dar maniobrabilidad en los grados de libertad requeridos. Los que más utilizan este último sistema son los ROVs, pero uno de los problemas asociados es el alto consumo de energía debido a la cantidad de impulsores [35].

Por último, existe el impulsor vectorial o de estructuras paralelas. Este es el menos estudiado, pero con grandes resultados tanto a nivel energético como de maniobrabilidad [36]. Consiste en orientar o posicionar un impulsor con el objetivo de controlar su propio movimiento.

En la figura 1.2a se presenta un robot esférico con múltiples propulsores de hélice, volviendolo en un robot completamente actuado [2]. En la figura 1.2b se muestra el robot impulsado vectorialmente, el cual posee una hélice pero con sus vectores paralelos puede realizar distintas orientaciones según las configuraciones de estos [3].

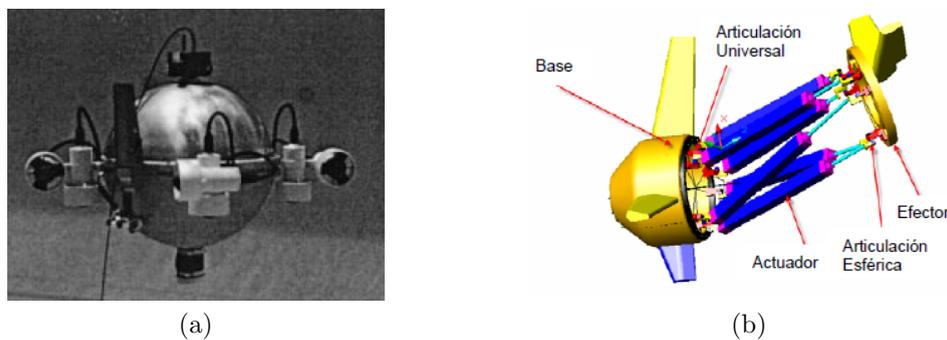


Fig. 1.2: sistemas de propulsión hélice. a) ODIN-III (múltiples propulsores) [2]. b) REMO (impulsores vectoriales) [3].

2. Planeador acuático

Los robots planeadores no poseen impulsores como los mencionados anteriormente. La forma de operar de estos vehículos se basa en modificar la flotabilidad y la dirección e inclinación de sus aletas. De esta manera puede conseguir movimientos ascendentes y descendentes, tantos rectos como diagonales [5]. La variación de la flotabilidad ocurre a través de un sistema de lastre, lo que hace que este sistema consuma una baja cantidad de energía a diferencia de los impulsores con hélice.

Su estructura es ideal para los AUV dedicados a la observación e investigación oceanográfica [4], ya que pueden operar por un largo tiempo debido a su bajo consumo de energía. Además, en magnitudes de peso y tamaño pueden ser menores a otras clases de vehículos submarinos.

En la figura 1.3a y 1.3b se presentan dos trabajos de diseño de vehículos de planeadores.



Fig. 1.3: sistemas de propulsión planeador. a) MarIam [4]. b) Slocum [5].

3. Bio-Inspirados

Este tipo de propulsión está inspirado en la fisionomía de los animales del océano, en general peces, cetáceos, medusas, etc. El sistema más simple consiste en una aleta con un grado de libertad colocada en la parte trasera de la cabina o vehículo submarino. El movimiento cíclico de la aleta produce ondas en el agua que impulsan el vehículo hacia adelante, produciendo el empuje en un solo sentido [37]. Con otro sistema de aletas laterales se puede cambiar de dirección o viraje además de elevarse o sumergirse.

Existen otros tipos de propulsiones inspiradas como robots anguilas que deformar todo su cuerpo para producir una onda con este y propulsarse [38]. Esta deformación está compuesta por vertebras que consisten en mecanismos paralelos de tres grados de libertad.

Otro robot Bio-inspirado es un robot pez raya que contiene múltiples aletas que se impulsan por deformación [6]. Cada aleta es capaz de girar sobre la aleta adyacente a la que se encuentra unida para moverse de forma sincronizada, produciendo un movimiento ondulatorio que impulsa el dispositivo en una dirección. En la figura 1.4a y 1.4b se presentan vehículos submarinos bio-inspirados donde en el primero se presentan dos vehículos que realizan los movimientos a través de la imitación de ondulaciones de aletas, describiendo distintos comportamientos en el movimiento. El segundo representa a un delfín, el cual realiza movimientos sinusoidales en la aleta inferior para realizar el movimiento de avance [7].



Fig. 1.4: sistemas de propulsión Bio-Inspirados. a) SEPIOS,SQUIDBOT [6]. b) Robotic Dolphin [7]

4. Inyección

Consiste en vehículos acuáticos que recogen el agua, luego la almacenan en un depósito y una bomba expulsa el agua donde esta es inyectada por medio de una boquilla. El agua sale a gran presión por la boquilla y la fuerza de empuje del agua en el vehículo es igual y opuesto, produciendo una aceleración en el robot [39]. La boquilla por la cual se inyecta el agua a presión está contenida en un tubo que puede girar en cualquier ángulo, por lo cual es posible obtener un empuje en las direcciones según la orientación que se le dé a la boquilla. Este sistema es utilizado principalmente en aplicaciones de alta velocidad y podría ser una alternativa viable al impulsor de hélice, ya que es más seguro evitando daño a la vida marina causadas por alguna hélice en movimiento y no es un sistema complejo a diferencia de los bio-inspirados.

En [40] se propone un sistema de impulso a inyección para AUVs pequeños de bajas velocidades y alta maniobrabilidad, produciendo anillos de vórtices inspirados en el impulso a pulso de las medusas y calamares.

En la figura 1.5 se presenta un AUV con propulsor de inyección vectorizado.

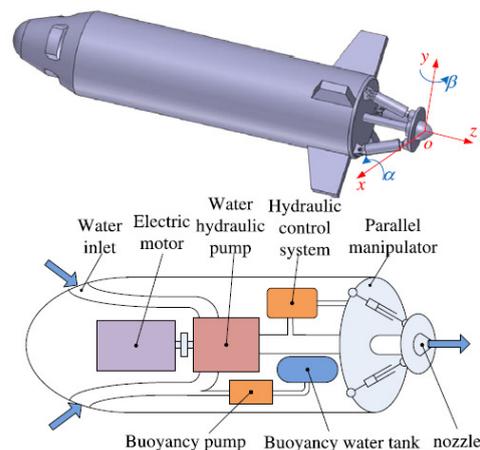


Fig. 1.5: vehículo submarino AUV a propulsión con inyección. Fuente: [8].

5. Magnetohidrodinámico (MHD)

Consiste en hacer circular corriente eléctrica por un fluido conductor (agua salada) el cual es atravesado por un campo magnético. El impulsor MHD genera el movimiento del fluido debido a la interacción del campo magnético y la corriente que circula a través de él [41].

Uno de los retos de este tipo de propulsores es que requieren campos magnéticos de alta intensidad para obtener una fuerza de propulsión considerable en un vehículo submarino. La máxima eficiencia que puede dar este tipo de impulsores está por debajo del 50 %, debido a que la fuerza de propulsión depende de la eficiencia de la inductancia [42].

Tabla 1.3: ventaja y desventaja en los tipos de propulsores.

Sistema de propulsión	Ventaja	Desventaja
Impulsores de hélice	<ul style="list-style-type: none"> · Permite una alta maniobrabilidad a altas y bajas velocidades. · El uso de múltiples impulsores permite maniobrabilidad en diversos grados de libertad. 	<ul style="list-style-type: none"> · Genera ruido en el ambiente, alterando la vida marina. · Consumo mayor de energía.
Planeador acuático	<ul style="list-style-type: none"> · Bajo consumo de energía. · Baja contaminación acústica en el medio. 	<ul style="list-style-type: none"> · Bajas velocidades. · Avance limitado al movimiento vertical.
Bio-inspirados	<ul style="list-style-type: none"> · No contamina de ruido el medio, por lo que no altera la vida marina. · Aprovecha la fisonomía de la fauna oceánica para plantear sistemas de propulsión. 	<ul style="list-style-type: none"> · No alcanza grandes velocidades como la propulsión por hélices. · Requiere un mayor estudio y conocimientos en la fisonomía de peces entre otros.
. Inyección	<ul style="list-style-type: none"> · Aprovecha el medio como el agua para realizar su propulsión. · Puede alcanzar grandes velocidades. 	<ul style="list-style-type: none"> · Se necesita un espacio o volumen en el robot para almacenar agua. · Baja precisión en maniobrabilidad.
Magnetohidrodinámico	<ul style="list-style-type: none"> · No tiene partes móviles, por lo tanto es más fácil resolver problemas de estanqueidad y mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> · Los electrodos reducen drásticamente el rendimiento electromecánico, debido a su disolución y desprendimiento de gases causada por la electrólisis de los materiales afectados.

1.2.3. Tipos de materiales y geometrías utilizadas en la fabricación

La cabina del robot o vehículo submarino es la estructura principal de este, pues en su interior se encontrarán dispositivos y elementos del sistema como drivers o controladores para los propulsores, sistemas embebidos como el microcontrolador y sus periféricos, fuentes de energías como pueden ser baterías de algún tipo, sensores, etc. Por lo que el diseño de esta estructura es fundamental en el cuidado de los componentes mencionados, ya que una fractura y en consecuencia filtración de agua podría significar el fin de la misión.

Algunos factores que determinarán el diseño de esta estructura son: la profundidad a operar y por lo tanto la presión que este pueda soportar, niveles de temperatura a soportarse, resistencia a la corrosión, facilidad para ensamblar y desensamblar, factibilidad de su construcción y el costo.

En [27] se presenta una discusión sobre los diferentes tipos de materiales que mayormente se utilizan para la fabricación de cabinas, donde principalmente predominan materiales metálicos, plásticos y compuestos.

En la tabla 1.4 se muestran los materiales usados comunmente en vehículos submarinos. Donde se puede ver que los materiales compuestos como CFRP (fibra de carbono) y GFRP (fibra de vidrio) presentan mejores propiedades que los metálicos y plásticos. Además es importante mencionar que la característica deseada del material es que sea altamente resistente y de bajo peso.

En cuanto a los materiales metálicos el titanio es el mejor en cuanto resistencia/peso pero tambien el más costoso, le sigue el aluminio en cuanto resistencia/peso y su precio es mas asequible. No obstante, la estructura de aluminio debe ser anodizadas para evitar la corrosión.

Por último, el acrílico y el PVC se utilizan para misiones de baja profundidad, donde el primero no supera el kilometro en su misión y es usado comúnmente para ventanillas del vehículo, mientras que el segundo es usado para diseños económicos que trabajan en pequeñas profundidades.

Tabla 1.4: materiales para cabinas de vehículos submarinos. Fuente: [27]

Material	Densidad (kg/dm ³)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Módulo de tensión (GPa)	Resistencia específica (KNm/kg)
Acero de alta resistencia (HY80)	7.86	550	207	70
Aleación de Aluminio (7075)	2.9	503	70	173
Aleación de Titanio (6-4 STOA)	4.5	830	120	184
CFRP (Epoxy/S-Iass)	2.1	1200	65	571
GFRP (Epoxy/HS)	1.7	1200	210	706
Acrílico	1.2	103	3.1	86
PVC	1.4	48	35	34

En [9] se entrega información de los materiales usados para la fabricación de la cabina a través de una muestra de vehículos AUVs, siendo lo más utilizado el aluminio, como se puede ver en la figura 1.6.

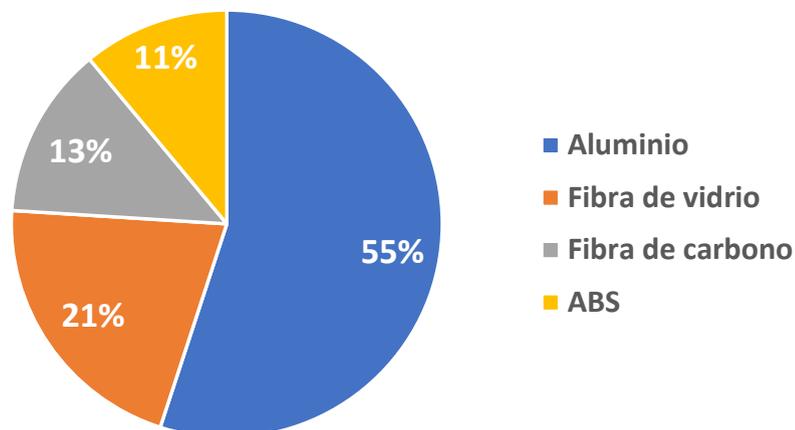


Fig. 1.6: materiales usados en la fabricación de la cabina en AUVs. Fuente: [9].

Como se señaló anteriormente es importante utilizar materiales que sean resistentes, pero además ligeros, es por eso que el uso del aluminio predomina en cuanto a fabricación. Por otro lado, los materiales compuestos como la fibra de vidrio y fibra de carbono ocupan los siguientes lugares, siendo la fibra de vidrio más usada como material compuesto debido a su bajo costo en comparación con la fibra de carbono.

Otro factor a considerar en el diseño de la cabina es la geometría de esta, ya que está directamente relacionada con las fuerzas de arrastre que se generarán en el movimiento. Estas fuerzas de arrastre son proporcionales al cuadrado de la velocidad del robot. Cuando este se mueva a una velocidad constante, la fuerza generada por el impulsor será igual a las fuerzas de arrastre. Por lo tanto, a menores fuerzas de arrastre menor es la energía consumida durante la navegación del robot [43]. En general, en los diseños de cabinas se encuentran formas cilíndricas. Esto se debe a que las fuerzas de arrastre que se generan son pequeñas comparadas con otras geometrías utilizadas. Además esta forma geométrica es adecuada para resistir la presión hidrostática generada a grandes profundidades [44].

La revisión que hace [9] de las geometrías más utilizadas en AUV's, arroja que un 42% de una muestra de 33 modelos están diseñados como torpedos, seguidos de diseños forma tipo gota, óvalos, etc. Lo que indica una tendencia a geometrías cilíndricas. El gráfico de este estudio se presenta en la figura 1.7.

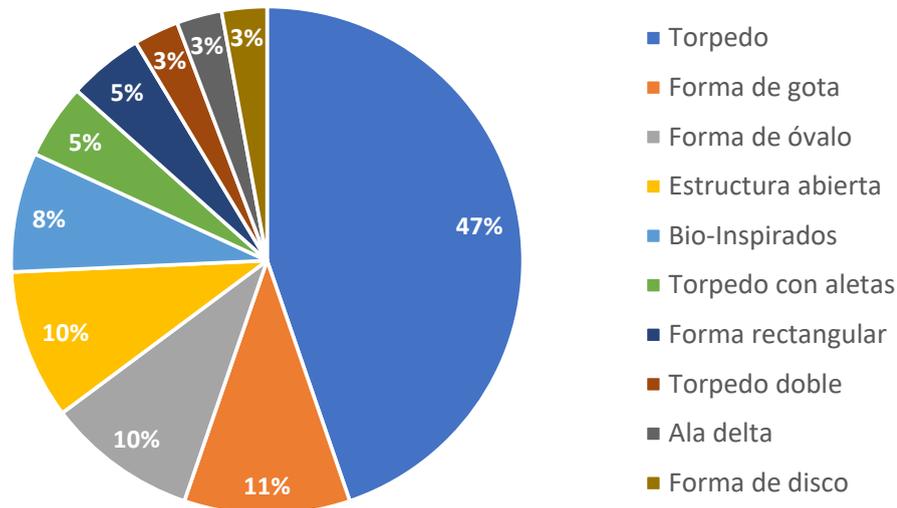


Fig. 1.7: geometrías utilizadas en cabinas de AUV's. Fuente: [9].

1.2.4. Fuentes de energía

Los vehículos submarinos necesitan de una fuente de energía debido al uso de actuadores y dispositivos electrónicos para realizar su misión. En esta sección se revisan los tipos de fuentes de energía que más se implementa en la robótica submarina.

Estos sistemas pueden obtener energía desde 3 categorías; fuente interna, fuente de superficie a través de un cable o umbilical y la combinación de las dos. La categoría a implementar se definirá mediante el objetivo y misión del robot, ya que si se conoce el volumen de trabajo el uso de umbilical es la mejor opción. No obstante, las otras dos opciones son válidas, dependiendo del objetivo de estudio y las condiciones para llevar a cabo el proyecto en cuanto a tiempo y presupuesto.

Las fuentes de poder más comunes en un robot submarino son las baterías. Sin embargo, la capacidad de esta limita parámetros como el rango de trabajo, tiempo de servicio y tiem-

po de carga. No obstante, estas han mejorado en la última década [28] en terminos de alta densidad de energetica, aumento en el rango de carga y descarga, características de corriente deseable, ancho en funcionamiento/almacenamiento del rango de temperatura, fiabilidad, aumento en el ciclo de vida, bajo costo en compra/mantenimiento, y seguridad contra fuego y explosiones.

En la tabla 1.5 se presentan las fuentes de energía más utilizadas en esta área, donde se encuentran baterías primarias y secundarias, siendo las primeras mejor en resistencia. Las más comunes dentro de las primarias son las alcalinas, debido a que poseen una alta densidad de energía y de bajo costo a diferencia de las de litio. No obstante, pueden ser peligrosas por posibles emanaciones de gases como hidrógeno y su sensibilidad a altas temperaturas [45].

En [46] se revisan fuentes de energía, particularmente en AUVs que utilizan principalmente celdas de combustible. Sin embargo, el contexto es el análisis de diseños realizados de 1990 a 1999, donde no hay rastro del uso de baterías como Li-ion y Li-po. Hoy en día, estas son muy populares [47], ya que tienen la ventaja de contar con una alta densidad energética, largos ciclos de trabajo, tienen una descarga relativamente baja y son ligeras, además de su asequibilidad, que podrían diferenciarlas de las fuentes primarias. En la tabla 1.5 se resumen las propiedades de las baterías comunmente implementadas en los trabajos de vehículos submarinos, tanto baterías primarias como secundarias, mientras que ventajas y desventajas de estas se presentan en la tabla 1.6.

Tabla 1.5: resumen de características de baterías usadas comunmente. Fuente: [28].

Tipo	Energía/masa (Wh/kg)	Energía/volumen (Wh/l)	Calificación	Ciclo de vida
Alcalina	140	-	-	-
Litio	375	-	-	-
Ácido sólido	20-30	60-80	-40-50	700
Plata-Zinc	100-120	180-200	-48-71	100
Ni-Cd	40-60	50-150	-40-60	2000
Ni-metal híbrido	60-120	140-300	Ambiente	1000
Ion de litio	100-265	250-730	-20-45	400-1200
Polímeros de litio	130-200	170-300	Ambiente	300-3000

Tabla 1.6: ventajas y desventajas de baterías en vehículos submarinos. Fuente: [28].

Tipo	Ventajas	Desventajas
Alcalina	· Barato	· Fuga de gas a altas temperaturas
Litio	· Alta densidad de energía	· Costoso
Ácido sólido	· Bajo costo, largo ciclo de vida (1000)	· Baja densidad de energía, fuga de hidrógeno
Plata-Zinc	· Alta densidad de energía	· Ciclo de vida limitado (40-100). Necesita mantenimiento, lo que resulta costoso
Ni-Cd	· Largo ciclo de vida, baja velocidad de descarga, buen rendimiento a baja temperatura.	· Efectos de memoria, proceso de carga exotérmico no dañino al ambiente.
Ni-metal híbrido	· Alta densidad de energía, efecto de memoria reducido	· Autodescarga, corriente de descarga limitada
Ion de litio	· Alta densidad de energía, largo ciclo de vida, sin efecto de memoria	· Efecto de envejecimiento.
Polímeros de litio	· Factor de forma flexible, liviano, seguridad mejorada	· Baja densidad de energía comparado a baterías Li-ion

1.2.5. Sensores

Los sensores son utilizados en la robótica submarina para diversas tareas; como la identificación de parámetros del ambiente a inspeccionar, imágenes en tiempo real a través de cámaras y sensores que permiten localizar el vehículo respecto a un sistema dado, el cual permite conocer su velocidad y aceleración. El control de estas variables permitirá el éxito de la misión encomendada. Es por esto que en esta sección se abarcan tipos de sensores utilizados, para posteriormente identificar cuál o cuáles se considerarán en este proyecto con el fin de implementar un control de posición.

En este apartado, la revisión de los sensores se categoriza en 3, en los cuales se desglosa mencionando sensores que comunmente se utilizan [43]:

1. Sensores de posicionamiento

- GPS (Sistema de posicionamiento global)

- IMU (Unidad de medición inercial)
- Brújula de estado sólido
- Velocímetro Doppler de navegación
- Sonar para detección de obstáculos
- Sensor de profundidad
- Sistemas de posicionamiento acústico
- Sistemas de Visión

2. Sensores de estado interno

- Medición de consumo eléctrico
- Detector de inundación

3. Sensores del ambiente

- Sensor de conductividad
- Sensor de pH
- Sensor de densidad
- Sensor de temperatura
- Sensor de metales

Si bien todos estos pueden ser importantes, como se menciona al comienzo, el posicionamiento del vehículo es vital para llevar a cabo la misión. Por lo tanto, en esta sección hace énfasis en este tipo de sensores, pues uno de los objetivos del proyecto es el control de posicionamiento.

Los GPS no pueden ser usados bajo el agua. se utilizan en la superficie para monitorear el estado de posicionamiento actual de un ROV o el de un AUV siempre cuando emerjan a la superficie [48].

Las IMU entregan información de variables como aceleraciones lineales y velocidades angulares del vehículo. Es por esto que se utilizan para obtener las mediciones de los ángulos Roll, Pitch y Yaw, utilizando el giroscopio de esta y comunicando esta información comúnmente a un microcontrolador, para este procesar la información [49].

El sonar para detección de obstáculos se basa en arreglos de hidrófonos [50] que utilizando la diferencia de tiempo entre la emisión de la señal y el eco recibido se determina la distancia a la que se encuentra el objeto. También puede utilizarse emisores de láser pero estos suelen presentar problemas en aguas turbias [43].

En cuanto a los sistemas de posicionamiento acústico se utilizan para determinar la posición del robot en x - y - z utilizando dos dispositivos, un emisor y un receptor. La distancia se obtiene a través del principio de tiempo de vuelo, triangulizando la señal recibida. Existen 3

tipos de sistemas de posicionamiento acústico; LBL (Long-Baseline System) [51], SBL(Short-Baseline System) [52] y USBL(Ultra Short-Baseline System) [53].

Por último, los sistemas de visión se utilizan para obtener imágenes del lugar a inspeccionar o de la operación en la que se encuentren. Además, se puede obtener un estimado del movimiento relativo del vehículo y también el absoluto usando un algoritmo llamado SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), usado para el seguimiento por visión y control de posición. En [54] se explica que el algoritmo de SLAM también es usado en aplicaciones como detección y clasificación de objetos, reconstrucción 3D, mosaicos, localización simultánea y mapeo, como también en evitar obstáculos o mantener distancias constantes por razones de seguridad. Para obtener mejores resultados en la inspección o reconocimiento de objetos, el sensado 3D puede ser logrado usando sistemas de cámara estereó y luz estructurada activa rangos pequeños [55]. En [56] se presenta un AUV que tiene por objetivo la inspección para investigación científica, el cual utiliza 2 hidrófonos como sensores de navegación acústica para la obtención de la posición. Estos se encuentran en el frontis del vehículo y su señal es comunicada al controlador. En [57] un robot UAV para inspección visual del fondo marino, utiliza una boya para localizar y conocer la posición absoluta del vehículo, basándose en un sistema acústico del tipo USBL, una unidad de navegación inercial (INS) y un GPS. Además, el robot cuenta con un sistema de navegación interno basado en EKF (Filtro de Kalman extendido), que utiliza un sensor de velocidad basado en efecto Doppler y una INS con un giroscopio de fibra óptica (FOG).

1.2.6. Técnicas de control

En esta sección se hace una revisión de las estrategias de control, métodos y leyes que se han propuesto para robots submarinos.

En [58] se utiliza el concepto de Sistema de Control de la Misión (MCS por Misión Control System). El MCS es un conjunto de programas que se hacen responsable de que se lleve a cabo la misión deseada. Este contiene los elementos de Guiado, Control y Navegación del robot. Las tareas dependerán del estado del robot y del ambiente, por lo tanto el MCS se encarga de manejar estas tareas, definiendo la prioridad a ejecutar de cada una de ellas. El MCS se compone por los siguientes sistemas:

- **Generador de trayectorias:** Se encarga de generar trayectorias para alcanzar la misión. La información generada (posición, velocidad y aceleración) es enviada al Sistema de Control para que este alcance las referencias deseadas. Las entradas de este sistema serán los puntos guías que el usuario indique e información que entrega el Sistema de Navegación. También puede recibir información del ambiente, como perturbaciones de corrientes marinas o obstáculos en el trayecto.
- **Sistema de control:** El sistema de control se encarga calcular las fuerzas necesarias que debe generar el sistema para alcanzar las referencias deseadas. Este, incluye el diseño y sintonización de las leyes de control que regularán el movimiento del robot. Por lo tanto, el sistema recibirá la información de variables como posición, velocidad y aceleración deseada, y el estado actual de estas a través de sensores. En general las le-

yes de control pueden consistir en leyes de control clásico, no-lineal, control inteligente, sistemas basados en comportamiento, etc.

- **Sistema de navegación:** Este sistema recibe la información de los sensores, ya sean posición, velocidad y aceleración, para luego procesarlas mediante algoritmos y enviarlas al Generador de trayectorias y el Sistema de control.

En [59] se presenta una clasificación de los tipos de MCS de AUVs en la que se identificaron 4 arquitecturas de control: Jerárquica, Distribuida, Por capas e Híbrida. Por otro lado, en [60] se propone un nuevo control de arquitectura basado en inspección en AUVs, donde la clasificación de arquitecturas de control son: Deliberativa, Reactiva e Híbrida. En [61] se desarrolla un control de arquitectura en tiempo real para un robot UUAV, en el cual se hace una revisión de arquitecturas existentes, basándose en estas y coincidiendo con la de los trabajos en [59] y [60]. Por tanto se considerará la clasificación de arquitecturas de este último trabajo. De acuerdo con esto, se describen brevemente las arquitecturas en la tabla 1.7.

Tabla 1.7: arquitecturas de Control.

Arquitectura	Descripción
Deliberativa	Se utiliza un sistema de prioridades piramidal, niveles de mayor a menores responsabilidades. Los niveles más altos se encargan de la misión del robot y los más bajos de problemas más específicos.
Reactiva	Se basa en el comportamiento y posee una estructura paralela de comunicación, donde no existe jerarquía de supervisión de tareas. El robot puede presentar cambios en la perspectiva de su misión, pero se puede resolver definiendo un sistema de arbitraje para reestablecer el objetivo de la misión.
Híbrida	Combina tanto la arquitectura Deliberativa como la Reactiva, sacando provecho de lo mejor de cada una. Esta se divide en 3 niveles; capa Deliberativa, capa de ejecución de control y capa de función reactiva.

A continuación se revisan 3 tipos de estrategias de control que se implementan en robótica submarina; control clásico, control no-lineal y control inteligente, con el fin de identificar ventajas en la implementación de cada uno, debido a que este trabajo contempla establecer un control de posición para un robot submarino.

1. Control clásico

En cuanto a la implementación del Control clásico, tenemos el caso del controlador PID, cuya ley de control se expresa en [62] para un robot submarino deslizador. En la

ecuación 1.1 se presenta la ley de un control clásico PID.

$$PID = K_p e + K_i \int_{t_0}^{t_1} e(\tau) d\tau + K_d e \quad (1.1)$$

Además se ha propuesto en [58] el controlador PID con realimentación de aceleración.

$$PID = [K_p e + K_i \int_{t_0}^{t_1} e(\tau) d\tau + K_d e] - H\dot{v}, \quad (1.2)$$

donde \mathbf{H} puede ser constante o dependiente de la frecuencia. El propósito de la realimentación de aceleración es que el sistema sea menos sensible a perturbaciones externas como lo pueden ser las corrientes marinas.

En [10] se propone un controlador PD, con el fin de que las maniobras del robot sean suaves a bajas velocidades y se mantenga con estabilidad. Además, el sistema se modela dinámicamente, considerando componentes hidrodinámicos, convirtiendo la implementación del control PD aún más eficaz debido a la consideración de la amortiguación del sistema contra la dinámica del fluido. En la propuesta, la salida del control proporcional esta basado en la diferencia de compensación del punto deseado y el actual del vehículo. Mientras que la salida del control derivativo se basa en los cambios de velocidad del robot. En la figura 1.8 se presenta el esquema de control que se propone en [10], el cual considera un modelo dinámico del sistema e implementa un control PD.

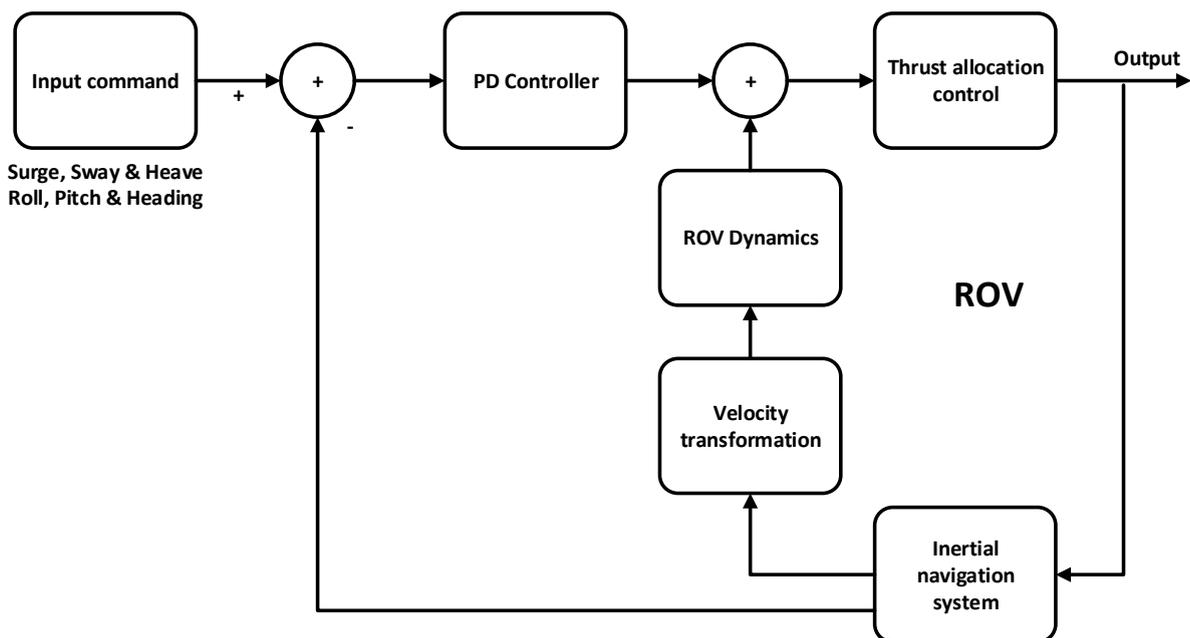


Fig. 1.8: esquema de control PD propuesto para ROV ROSUB6000. Fuente: [10]

Se implementa en [11] un control PID para la posición de un robot submarino de 6 GLD (grados de libertad). Este vehículo consiste en 8 propulsores de hélices distribuidos y orientados espacialmente de tal manera que pueda lograr los 6 GDL. El carácter no lineal del modelo es suprimido a través un método de linealización por retroalimentación. El trabajo concluye cumpliendo el objetivo de posicionar y orientar el robot dada una referencia deseada. Sin embargo, algunos parámetros simulados no son los correctos debido a la incertidumbre hidrodinámica del modelo. Aún así, usando el control PID en tiempo discreto, los resultados confirman que el controlador es lo suficientemente robusto para controlar las variables de estado y posiciones del robot cuando este se encuentra bajo perturbaciones. En la figura 1.9 se presenta el diagrama de bloques del controlador.

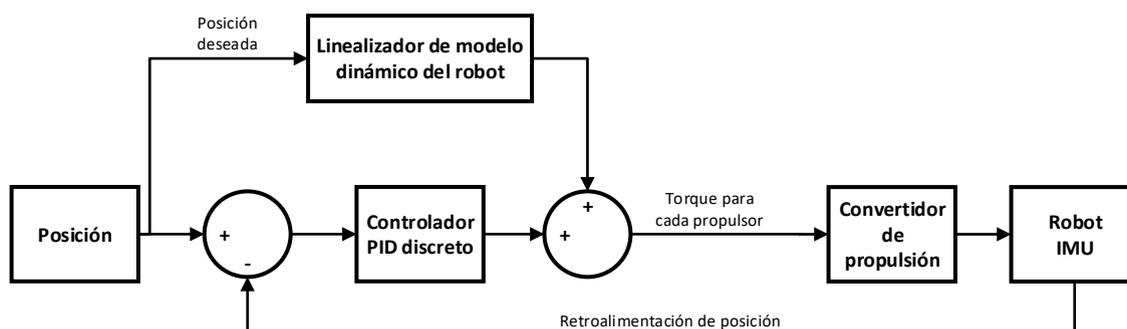


Fig. 1.9: diagrama de bloque para control PID. Fuente: [11]

Por otra parte el control clásico se implementan en conjunto con otras estrategias de control de carácter no-lineal o inteligente. Esto se debe a que el control clásico por sí solo no puede resolver problemas de error en trayectoria debido a que no considera los parámetros hidrodinámicos del modelo de un vehículo submarino. A esta implementación de dos o más estrategias de control simultáneas, se les llama control híbrido. En [63] se presenta un control híbrido, el cual utiliza un controlador no-lineal SMC (control modo deslizante) y un control clásico PID. Este último se utiliza para disminuir el error en seguimiento de trayectoria, mientras que el control SMC para compensar la incertidumbre de parámetros hidrodinámicos debido a su carácter no-lineal.

2. Control no-lineal

Este tipo de control se implementa en sistemas no lineales como es el caso de los vehículos submarinos. A diferencia del control clásico que utiliza estrategias para sistemas lineales [64], el control no lineal trabaja directamente con los términos no lineales, para obtener un modelo robusto a modelos imprecisos y a perturbaciones que son difíciles de medir o estimar [65], como es el caso en sistemas submarinos, donde este tipo de control puede dar solución al problema de determinar parámetros hidrodinámicos del robot.

En [66] se implementa un control no lineal para el seguimiento de trayectorias. El controlador se diseña a partir de la teoría de Lyapunov y técnicas de "Backstepping", las cuales arrojan un resultado de error cercano a 0 en trayectoria. Por otra parte,

en [12] se diseña un controlador no lineal robusto jerárquico (HRN) para el seguimiento de trayectoria de un AUV sujeto a incertidumbres como corrientes marinas, desconocimiento del modelo del sistema y variaciones de parámetros. El propósito del controlador HRN en este caso es utilizar back-stepping y SMC (sliding-mode control) basandose en la cinemática y dinámica del sistema, donde se comienza con un sistema simplificado de 4 GDL para terminar con en lazo cerrado con 6 GDL obteniendo buenos resultados. En la figura 1.10 se presenta el diagrama de bloque del controlador HRN que se menciona en el trabajo anterior.

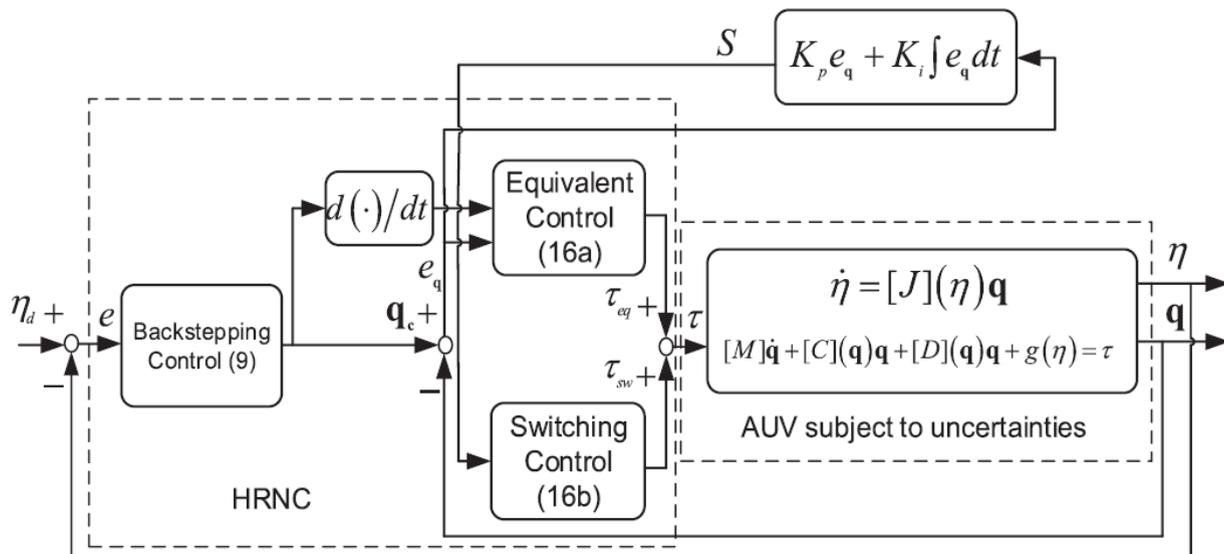


Fig. 1.10: diagrama de bloque para un controlador HRN. Fuente: [12]

Otros investigadores proponen controladores adaptativos [67], ya que de esta manera se puede encontrar una solución al problema de determinar los parámetros hidrodinámicos del robot. En este punto es importante mencionar que la tarea de encontrar dichos parámetros es difícil mediante la formulación matemática, y, por otro lado, determinarlos experimentalmente conlleva a un costo económico y de tiempo [68]. En el trabajo propuesto en [68] se presenta un modelo dinámico y sistema de control adaptativo para ROVs, donde no se han considerado los parámetros hidrodinámicos ni ningún tipo de efecto de movimiento de fluidos. Además, se menciona que los parámetros del modelo dinámico pueden variar dependiendo de la configuración del ROV y su entorno. La estrategia de control deja en claro que no se requieren conocimientos de parámetros del sistema a priori. Los resultados arrojaron que el control posee un alto rendimiento en cuanto a velocidad y precisión en presencia de incertidumbres del vehículo y su entorno, no así su contraparte, el sistema de control no adaptativo.

3. Control inteligente

El control inteligente permite utilizar técnicas distintas a las antes vistas, basadas en algoritmos de aprendizajes para estimar parámetros [69]. Si bien el control no

lineal puede entregar un modelo robusto ante incertidumbres, no es suficiente en algunos casos donde las perturbaciones son significativas y/o se requiera de movimientos precisos [70]. Entonces, este control se implementará para estimar parámetros hidrodinámicos no conocidos o que poseen una magnitud lejana a la realidad.

Los trabajos propuestos en [71] y [72] presentan controladores basados en redes neuronales y de aprendizaje para robots submarinos. El primero menciona la dificultad de obtener buenos resultados a través de un control lineal convencional [71], en términos de velocidad y precisión, por lo cual el documento propone una red neuronal de capas múltiples, creando un sistema de guía inteligente y un sistema de estrategia de control que pueda hacer frente a las incertidumbres de los coeficientes hidrodinámicos que existen en el entorno marítimo a lo largo de una trayectoria deseada. El problema que encuentra el autor en cuanto a los sistemas de control con redes neuronales es justamente entrenar el controlador, pero para esto él propone el uso de un algoritmo de retropropagación (error-back) [73]. Este algoritmo minimiza el error cuadrático en cada entrenamiento. El trabajo que se menciona en [72], se presenta un control adaptativo con capacidad de aprendizaje y adaptación a cambios en los parámetros principalmente de centros de gravedad e inercia. Esto debido a que existen robots submarinos que tienen por finalidad de manipulación de objetos.

En [74] un control modo deslizante adaptativo es propuesto, utilizando el principio del control SMC y una red neuronal local para estimar elementos desconocidos. Debido a el problema de vibraciones que causa el SMC se propuso un metodo de ganancia ajustable basado en funciones exponenciales. Cabe destacar que el control se realiza sin conocimientos del modelo dinámico y de propulsores del robot. En [13] se utiliza un control SMC como núcleo de sistema de control, basandose en el principio de control de tiempo óptimo, cuya solución se obtiene a partir de una red neuronal. Los resultados son logrados y mejorados con el controlador de tiempo-óptimo. Además el controlador es efectivo ante los parámetros no lineales inciertos. La figura 1.11 presenta un esquema del diagrama de bloques utilizado para este trabajo.

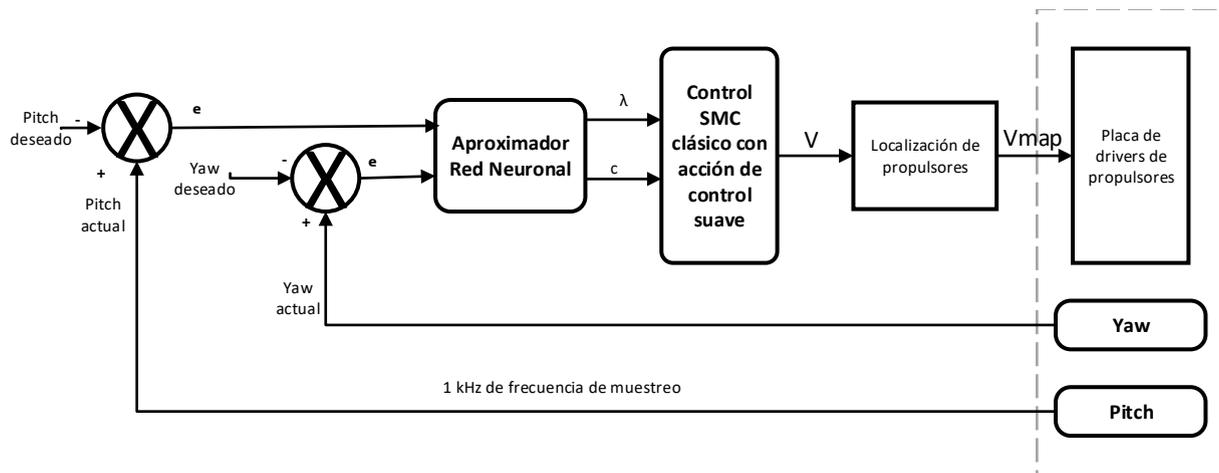


Fig. 1.11: diagrama de bloque del SMC óptimo basado en el tiempo de una red neuronal para el control de Pitch y Yaw con una acción de control suave. Fuente: [13]

Tabla 1.8: ventajas y desventajas de tipos de técnica de control.

Control	Ventajas	Desventajas
Clásico	· Diseño y sintonización documentado.	· No resuelve problemas de incertidumbre de parámetros.
No-lineal	· No necesita de un modelo preciso. Trabaja directamente con los terminos no-lineales. Robusto.	· Dificultad para determinar parámetros hidrodinámicos.
Inteligente	· No requiere un modelo dinámico del sistema. Capacidad para estimar parámetros de incertidumbre.	· Exige gran cantidad de cálculos en tiempo real. Tiempo de aprendizaje puede ser elevado. Se debe entrenar y supervisar las salidas deseadas.

1.3. Discusiones bibliográficas

Según la revisión bibliográfica que se realiza, en general se encuentran trabajos de vehículos submarinos autónomos AUV o en algunos casos semi-autónomos [1]. Son pocos los trabajos de ROVs que se realizan en la última década, salvo algunos como [31] en donde se necesita teleoperar a larga distancia y el diseño de este debe ser de grandes dimensiones y robusto al trabajar en el contexto de refinerías de petróleo. No obstante, la tendencia de la robótica submarina se encuentra direccionada hacia la automatización de estas tareas o misiones.

En cuanto a los actuadores comúnmente utilizados existe un sesgo en el uso de motores con hélice [33]. Esto se debe a que existe un vasto material bibliográfico para el diseño de

estas [75], [76], [77], obteniendo resultados favorables en el movimiento de un móvil, donde además el bajo costo de fabricación las hacen asequibles. Por otro lado se encuentran propulsores de hélice con orientación variable mediante el uso de servomotores [78] y de estructuras paralelas (vectorizadas) [3]. Con estos se disminuye la cantidad de propulsores, pero se deberá controlar el ángulo y configuración de las estructuras paralelas respectivamente.

Al revisar materiales y geometrías que se ocupan en el diseño de vehículos submarinos, se encuentra una diversidad de estos, variando en cada trabajo. La elección dependerá de varios factores como; objetivo del robot, profundidad a la que se someterá, presupuesto del proyecto, etc. De los materiales revisados (ver figura 1.6) la fibra de vidrio (GFRP) es el que se ajusta a este trabajo, ya que el prototipo de este trabajo no se diseña para operar en una gran profundidad, sino que para realizar pruebas en un ambiente controlado como puede ser una piscina. Además, este material es de bajo costo (a diferencia de la fibra de carbono), fácil proceso de fabricación y de mecanización. Por otra parte, en cuanto a geometrías (ver figura 1.7), existe una tendencia en que se diseñen con una geometría cilíndrica, debido a lo que explica [44] sobre las fuerzas de arrastre. No obstante, si existen diseños y productos comerciales que tienen otras formas geométricas [9], como pueden ser cubos o formas geométricas complejas pero siempre cuidando el suavizado en las aristas para no producir vórtices que a la larga generen cavitación [43].

Por otro lado, para controlar la posición de estos sistemas es necesario el uso de sensores de posicionamiento. En general se utiliza una IMU para enviar al sistema de control las velocidades, aceleraciones y orientaciones del robot [49]. Luego lo que se utiliza para saber la ubicación del dispositivo es un sistema acústico, que trianguliza la señal para saber la posición de este en X-Y-Z [50]. Además, la visión por cámara no solo se usa para inspección, sino que para conocer el posicionamiento del robot a través de algoritmos [54]. La información obtenida con los sensores dará paso a implementar una estrategia de control.

De las estrategias de control que se revisan, se encuentra un gran uso de controladores híbridos, donde por una parte se implementa un control no lineal acompañado de un control clásico como un PID o PD y en algunos casos redes neuronales. Este conjunto de estrategias de control resuelven problemas como incertidumbres en el modelo matemático (control no lineal) [65], errores en el seguimiento de trayectoria (control clásico) [64] y estimaciones de parámetros hidrodinámicos (redes neuronales) [69]. Se aplican estas estrategias para evitar realizar experimentos que suelen ser costosos económicamente y de tiempo.

Finalmente, de acuerdo a la discusión que se plantea, se utilizará fibra de vidrio para diseñar la estructura del robot, y por otra parte, la estrategia de control se validará mediante simulación el control de posición mediante un control clásico utilizando un PD para disminuir el error en trayectoria, pero además se utiliza el modelo dinámico para tener obtener una simulación más cercana a la realidad. Para la estimación de algunos parámetros se decide utilizar softwares como Solidworks y Ansys. En las siguientes secciones se presentan los objetivos del proyecto, así como sus alcances y limitaciones, metodologías, para luego continuar con el desarrollo de este, abarcando el diseño y la estrategia de control para la posición del submarino.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Fabricar un prototipo de vehículo submarino e implementar una simulación de control de posición.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Diseñar y fabricar estructura del robot submarino.
- Integrar componentes fabricados con dispositivos electrónicos.
- Implementar estrategia de control de posición en las coordenadas x , y , z .
- Simular el sistema en lazo cerrado para uno o más objetivos de posición.

1.5. Alcances y Limitaciones

1.5.1. Alcances

- El robot a controlar es solo un prototipo con propósitos académicos, por lo cual se excluye de ser un producto de comercialización.
- No se considera una puesta en marcha.
- El control de posición solo considera simulaciones de este y no la incorporación de un algoritmo en el dispositivo de control. (microcontrolador).
- El sistema de comunicación entre operador y planta queda fuera de la investigación de este trabajo.
- El sistema de locación del robot en un volumen de trabajo no se considera parte de este trabajo.
- La propuesta de control solo considera a (x,y,z) . Las orientaciones quedan excluidas.
- La obtención de los coeficientes hidrodinámicos de masas añadidas quedan excluidos de este trabajo.
- Las pruebas de hélices o propulsores para la obtención de parámetros no se consideran en este trabajo.

1.5.2. Limitaciones

- Uso de materiales y dispositivos que se encuentran disponibles en la Universidad de Talca, facultad de Ingeniería.
- El uso de motores tipo Brushless limita la cantidad de pruebas o entrenamientos que se pueden realizar sin antes recubrir con esmalte las bobinas para asegurar el funcionamiento de estas.

- El tipo de fuente de alimentación limita el tiempo de trabajo.
- Uso de softwares disponibles gratuitos o con licencia de Universidad.
- La estrategia de control a implementar debe adaptarse a la configuración del prototipo que se suministra, en este caso un dispositivo con 4 actuadores (sistema sub-actuado).

1.6. Metodología

Se deben seguir una serie de pasos para lograr los objetivos mencionados y alcanzar el cometido final del proyecto. A continuación se presentan los pasos necesarios para lograr lo propuesto:

1.6.1. Análisis del modelo matemático de un vehículo submarino

Se hace una revisión del modelo cinemático y dinámico de un vehículo submarino, de los cuales se hace el estudio del movimiento del robot, comportamiento de las fuerzas en el robot y el modelo matemático que se utilizará para realizar simulaciones.

1.6.2. Dimensionamiento de empuje y potencia requerida

Se debe realizar un cálculo para estimar el empuje necesario para mover el objeto en las distintas direcciones además de la potencia que este requiera. Posterior a esto se propone un diseño de hélice y un diseño de timón para el viraje.

1.6.3. Diseño en CAD y fabricación

En esta etapa se realiza el diseño y modelamiento en software CAD para tener una previsualización del sistema a fabricar, identificando posibles problemas a futuro de diseño y siendo esta la base para obtener una carcasa del vehículo que se utiliza en la fabricación, posterior a la etapa de diseño.

1.6.4. Integración de componentes electrónicos

El proyecto considera la propuesta de componentes electrónicos y su integración. En esta sección se proponen los componentes necesarios para la movilidad del dispositivo, y en consecuencia se estima un consumo del sistema para luego seleccionar una fuente de alimentación.

1.6.5. Simulación de la Estrategia de Control

Es imprescindible conocer el comportamiento aproximado del sistema, para tener en consideración las condiciones de operación ideales de este robot y estrategia de control.

Para realizar las simulaciones se utilizará el software Matlab de MathWorks, el cual es un software de simulación numérica que entrega herramientas de gráficos y paquetes o toolboxes como Simulink que nos ayuda a simular el comportamiento de sistemas dinámicos.

2. Sistema de propulsión

Como se ha mencionado en el capítulo 1, el sistema de propulsión tiene la tarea de mover el vehículo durante su misión.

En este trabajo se consideran 3 propulsores, donde dos de ellos se encargan del empuje vertical (eje Z del vehículo) y el tercero del desplazamiento horizontal (eje X del vehículo). Además se considera un timón, por lo que también se considera un dimensionamiento de este y como esta conformado en el sistema.

2.1. Empuje y potencia requerida

2.1.1. Empuje

El equipo debe ser capaz de contrarrestar el empuje que genera una corriente determinada. Si bien en condiciones ideales no se utilizará este empuje máximo, se considera como factor de seguridad ante eventuales corrientes que puedan afectar al vehículo.

La fuerza de empuje o arrastre generado por la corriente marina es una variable difícil de establecer debido a la combinación de fenómenos producidos por olas y viento. Además, al estar estos fenómenos relacionados, la corriente puede adaptar distintas direcciones, dependiendo también de las condiciones geográficas en donde se implemente el vehículo.

Para el cálculo de la fuerza de arrastre que debe contrarrestar el sistema de propulsión del robot, se tienen las siguientes consideraciones:

- Se establece como $0.5[m/s]$ la velocidad de la corriente marina para el diseño del sistema de propulsión. Se recomiendan velocidades de diseño entre $0.2 - 1.0[m/s]$ [79].
- Se considera la condición extrema en donde la corriente del agua actúa de forma perpendicular sobre una placa plana de área aproximada a la proyectada por el robot submarino.
- Se realizan dos cálculos de empuje. El primero considera el área proyectada para el desplazamiento vertical (en eje Z) y el segundo para el área proyectada en el avance frontal (en eje X).

En las figuras 2.1 y 2.2 se presentan las áreas proyectadas para calcular el empuje necesario al desplazar el vehículo de manera vertical (sumersión/emersión) y horizontal (avance/retroceso) respectivamente.

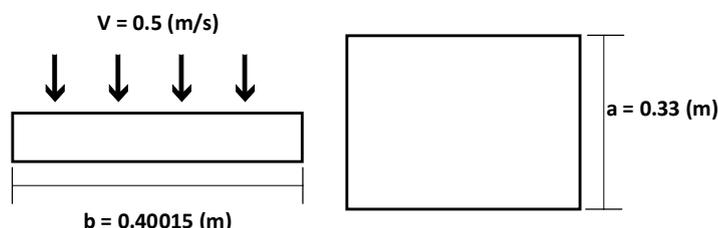


Fig. 2.1: área proyectada de vehículo submarino y vista superior.

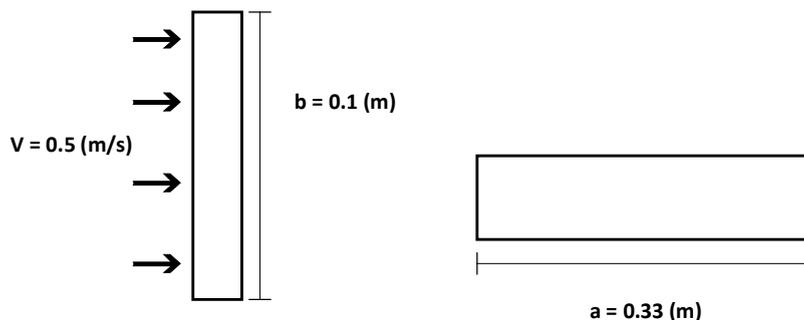


Fig. 2.2: área proyectada de vehículo submarino y vista frontal.

Primero se obtiene el empuje del área de 2.1. Para el cálculo de este se utiliza el método del coeficiente de arrastre (Cd).

$$F = Cd \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{V^2}{2} \quad (2.1)$$

Para el cálculo del coeficiente de arrastre (Cd) se utiliza el número de Reynolds (Re).

$$Re = \frac{V \cdot b}{\nu} \quad (2.2)$$

En donde:

- ρ : Densidad agua de mar = $1025[kg/m^3]$ [79]
- V : Velocidad corriente = $0.5[m/s]$
- b : Alto placa = $0.40015[m]$
- a : Ancho placa = $0.33[m]$
- A : Área de placa = $0.13204[m^2]$
- ν : Viscosidad cinemática = 1.287×10^{-6} a $13^\circ C$ [80]

Reemplazando los valores en (2.2):

$$Re = 155458.4305[-]$$

Para números de Reynolds mayores a 10^3 se tiene que el coeficiente de arrastre, para una placa plana normal al flujo es igual a $2[-]$ [80].

$$Cd = 2[-]$$

Reemplazando valores en (2.1) se obtiene la fuerza de empuje para el desplazamiento vertical (eje Z):

$$F = 33.84[N] = 3.45[kgf]$$

Se realiza el mismo proceso para el empuje correspondiente al área de 2.2.

En donde:

- b : Alto placa = $0.1[m]$
- a : Ancho placa = $0.33[m]$
- A : Área placa = $0.033[m^2]$

Las demás variables se mantienen igual al cálculo anterior. Por lo tanto, se obtiene:

$$Re = 38850.04[-]$$

$$Cd = 2[-]$$

$$F = 8.46[N] = 0.86[kgf]$$

2.1.2. Potencia requerida

Para la estimación de la potencia se considera que la hélice se mueve hacia la izquierda a velocidad V_1 , $0.5[m/s]$, en el fluido en reposo y diámetro D $0.075[m]$ como condición de diseño (ver figura 2.3).

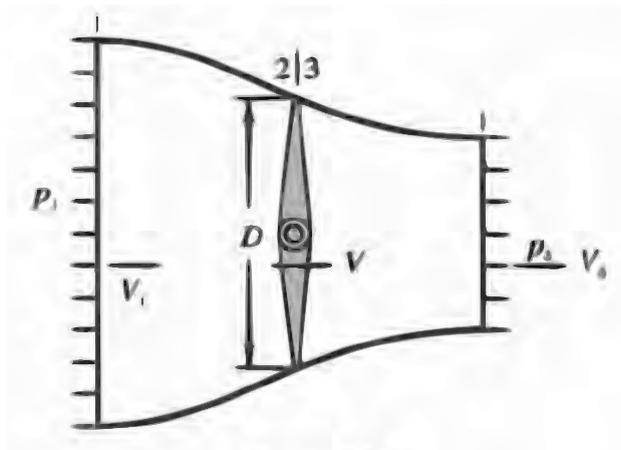


Fig. 2.3: volumen de control hélice. Fuente: [14]

De esta forma, sino se consideran los vórtices y el rozamiento, se tiene que:

$$EmpujeF = \rho \cdot Q \cdot (V_4 - V_1) = \rho \cdot \left(\frac{1}{4}\pi D^2 V\right) \cdot (V_4 - V_1) \quad (2.3)$$

El empuje también es igual a:

$$EmpujeF = \Delta P_{3-2} \left(\frac{1}{4}\pi D^2\right) \quad (2.4)$$

Igualando ambas expresiones:

$$\Delta P_{3-2} = \rho \cdot V \cdot (V_4 - V_1) \quad (2.5)$$

Aplicando el principio del trabajo y la energía cinética, y suponiendo que no existen pérdidas de carga, se tiene:

$$\text{Energía cinética inicial} + \text{Trabajo realizado} = \text{Energía cinética final}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 + \Delta P_{3-2} &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_4^2 \\ (V_4^2 - V_1^2) \cdot \frac{\rho}{2} &= \Delta P_{3-2} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Igualando (2.5) y (2.6), se establece que la velocidad a través de la hélice es aproximadamente el promedio de las velocidades delante y detrás de la hélice:

$$V = \frac{V_1 + V_4}{2} \quad (2.7)$$

$$V_1 = 0.5[m/s]$$

Reemplazando el empuje obtenido para una sola hélice, 16.92[N], en (2.4), se obtiene ΔP_{3-2} :

$$\Delta P_{3-2} = \frac{F}{\frac{1}{4}\pi D^2}$$

$$\Delta P_{3-2} = 3829.9[Pa]$$

Con este resultado se calcula V_4 mediante (2.6):

$$V_4^2 = \frac{2 \cdot \Delta P_{3-2}}{\rho} + V_1^2$$

$$V_4 = 2.8[m/s]$$

Con (2.7) se obtiene V :

$$V = \frac{0.5 + 2.8}{2} = 1.65[m/s]$$

Luego se obtiene el flujo másico dentro de un volumen de control:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot V \quad (2.8)$$

$$\dot{m} = 7.47[kg/s]$$

Rendimiento hidráulico de la hélice:

$$\eta_h = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} = \frac{\dot{m} \cdot V_1 \cdot (V_4 - V_1)}{\frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (V_4^2 - V_1^2)} \quad (2.9)$$

$$\eta_h = 0.303$$

La potencia total requerida para el motor (H):

$$H = \frac{F \cdot V_1}{\eta_h \cdot \eta_m} \quad (2.10)$$

$$\eta_m = 0.9 = \text{rendimiento motor}$$

Reemplazando, se tiene que la potencia requerida para cada motor orientado en Z es:

$$H = 31.02[W]$$

Luego se realizan los cálculos para la potencia requerida del motor orientado en X . En la tabla 2.1 se muestran los resultados obtenidos siguiendo los mismos pasos anteriormente desarrollados.

Tabla 2.1: cálculos obtenidos para potencia requerida en X .

Variable	Resultado
F	8.46 [N]
ΔP_{3-2}	1914.95 [Pa]
V_4	2 [m/s]
V	1.25 [m/s]
\dot{m}	5.66 [kg/s]
η_h	0.4 [-]
H	11.75 [W]

Para el diseño final se considera la potencia de 3 motores de 150[W], tanto para el desplazamiento en Z como en X . Estos corresponden a motores brushless para Drones, los cuales se encuentran disponibles en la Facultad de Ingeniería, por lo que en cuanto a potencia los motores están sobredimensionados. En el Anexo B.2 se presenta el motor a utilizar en este proyecto junto con sus características.

2.2. Diseño hélice

El diseño contempla 3 hélices encargadas de entregar el empuje calculado para el desplazamiento en Z y X respectivamente, siendo en el primer caso 2 hélices a utilizar. Estas hélices deben proveer el empuje calculado en la sección anterior. Sin embargo, se toma la decisión de utilizar la misma hélice que se diseña para el movimiento de Z en X , ya que el empuje se encuentra dentro de los parámetros que el movimiento en X requiere.

Para el cálculo de las hélices para Z se tiene la siguiente información:

- Empuje total: 33.84[kgf]
- Empuje por hélice: 16.92[kgf]
- Diámetro requerido: 75[mm]
- Direccionalidad: que permita el flujo en ambos sentidos

- Tobera: Se requiere tobera de aceleración
- Velocidad de corriente marina: $0.5[m/s]$

Con estos datos se procede a definir el diseño de la hélice para los propulsores correspondientes en la dirección Z . Para desarrollar el procedimiento se considera utilizar el método de "series sistemáticas".

Una serie sistemática de propulsores es un conjunto de formas de hélices relacionadas entre sí de manera geométrica y sistemática, elegidos para tener un buen rendimiento y comportamiento en cavitación y de las que, adicionalmente, se dispone de ensayos de propulsor aislado. Esta documentación es revisada de [15].

En este cálculo se estima el empuje de cada hélice y tobera por separado. Para esto se utilizará la serie denominada Ka como perfil para el diseño de la hélice. Esta serie de hélices se representa mediante gráficos llamados de "Propulsor aislado", en donde se relacionan las características geométricas con sus características hidrodinámicas. Además se considera esta serie debido a que se utiliza para diámetros menores.

Características geométricas:

- Z : número de palas
- D : Diámetro
- P : Paso
- A_d/A_o : Relación de áreas

Características hidrodinámicas:

- T : Empuje
- Q : Torque
- η : Rendimiento

En la figura 2.4 se representa la geometría básica de cuatro hélices de la serie "Ka". Cada una de estas hélice fue construida varias veces, solo modificando la relación paso/diámetro, para posteriormente ensayarlas en un canal de prueba asociándoles una tobera, obteniendo con esto un diagrama llamado "propulsor aislado" [15].

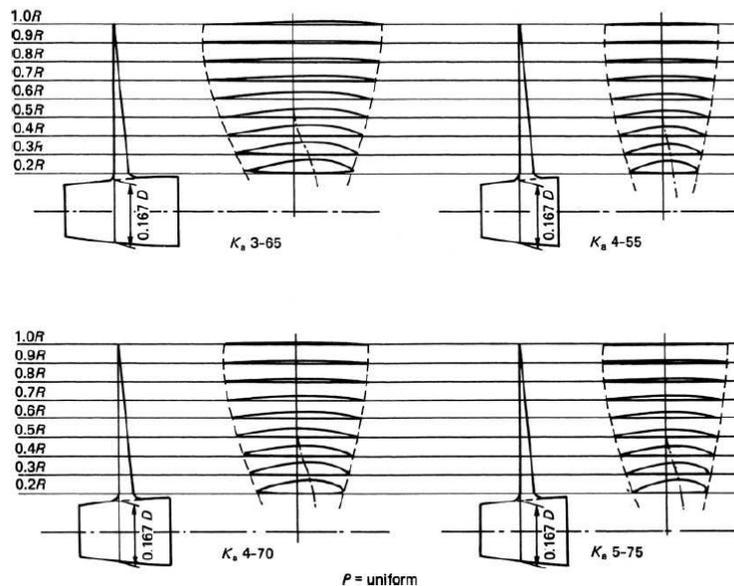


Fig. 2.4: geometría básica de series *Ka*. Fuente: [15]

Para el actual diseño se escoge la hélice serie "Ka 3-65", la cual fue fabricada para las siguientes relaciones de paso diámetro "P/D": 0.6, 0.8, 1.2, y 1.4.

En figura 2.5 se presentan los ensayos y curvas obtenidas que representan las características hidrodinámicas de la hélice serie Ka 3-65. En este grafico se encuentran los valores de los coeficientes de torque (KQ), coeficiente de empuje de hélice (KT), empuje de tobera (KTn) y de avance (J).

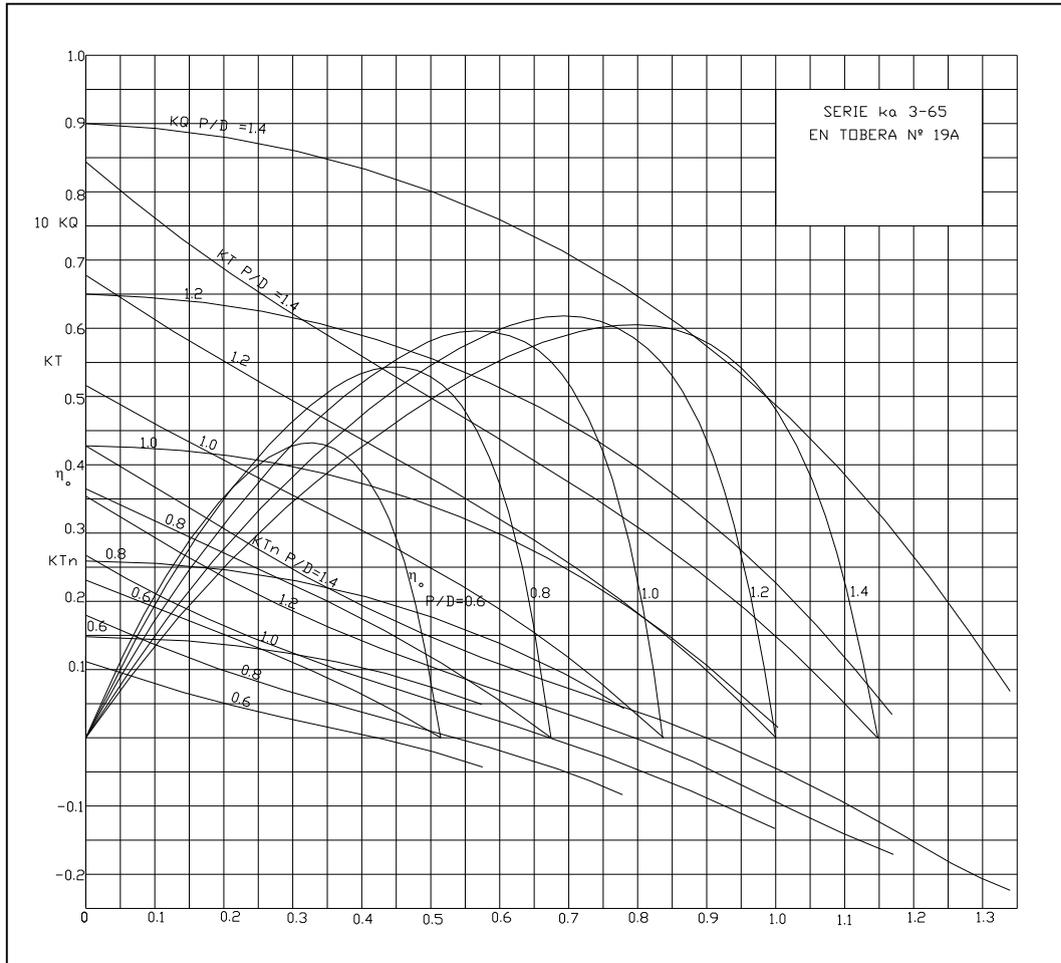


Fig. 2.5: gráfica de pruebas de serie Ka 3-65 para hélice con tobera N°19. Fuente: [16].

Datos de entrada:

- Diámetro de hélice = $75[mm]$
- Diámetro de salida de tobera = $80[mm]$
- Potencia del motor = $149.8[W] = 0.2[HP]$
- Revoluciones = $5010[rpm]$

Para poder estimar la hélice adecuada es necesario calcular el coeficiente de avance J . Para este caso se considera que al no existir avance, el coeficiente J definido en (2.11) es cero.

$$J = \frac{V_a}{n \cdot D} = 0 \quad (2.11)$$

Donde:

- V_a : Velocidad de avance = $0[m/s]$
- n : Revoluciones por segundo = $83.5[rps]$

- D : Diámetro de la hélice = $0.075[m]$

Luego, se determina el torque necesario que demanda la hélice, para de esta forma ingresar al gráfico y determinar cuál es la relación de paso/diámetro (P/D) más adecuada y el empuje que esta entregará. Se tiene la ecuación

$$DHP = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot (Torque)}{75}, \quad (2.12)$$

donde:

- DHP (Delivered Horse Power): Potencia entregada = $0.2[HP]$

Despejando el torque de la ecuación 2.12 se tiene que:

$$Torque = \frac{DHP \cdot 75}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{0.2 \cdot 75}{2 \cdot \pi \cdot 83.5} = 0.03[kg \cdot m]$$

Con el torque calculado se puede obtener el coeficiente de torque KQ mediante la ecuación

$$Torque = KQ \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^5, \quad (2.13)$$

donde:

- KQ : Coeficiente de torque [-]
- ρ : Densidad del fluido = $104.48[kg/m^4s^2]$

Despejando el coeficiente de torque de (2.13):

$$KQ = \frac{Torque}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} = \frac{0.03}{104.48 \cdot 83.5^2 \cdot 0.075^5} = 0.017[-]$$

Una vez obtenido el valor de $J = 0$ y el valor de $KQ = 0.017$ ($10KQ = 0.17$) se lee el gráfico de figura 2.5 e interpolando se obtiene el valor de la relación P/D más adecuada.

$$\begin{aligned} 0.175 &\rightarrow 0.8 \\ 0.170 &\rightarrow P/D \\ P/D &= 0.78 \end{aligned}$$

De lo anterior se despeja el paso (P):

$$P = 58.2[mm]$$

De la misma forma para obtener KT se interpola.

$$\begin{aligned} 0.675 &\rightarrow 1.2 \\ KT &\rightarrow 0.78 \\ KT &= 0.44 \end{aligned}$$

Con (2.14) se puede calcular el empuje que genera la hélice.

$$Empuje = KT \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4 \quad (2.14)$$

Reemplazando valores, se tiene que

$$Empuje = 0.44 \cdot 104.48 \cdot 83.5^2 \cdot 0.075^4 = 10.14[kgf]$$

Para determinar el empuje que genera solo la tobera se procede de la misma forma, interpolando para obtener el valor del coeficiente KT_n .

$$\begin{aligned} 0.26 &\rightarrow 0.8 \\ x &\rightarrow 0.78 \\ KT_n &= 0.2535 \end{aligned}$$

El coeficiente KT_n se utiliza para el cálculo del empuje de la tobera sola, utilizando la siguiente ecuación:

$$EmpujeTobera = KT_n \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4 \quad (2.15)$$

Reemplazando se obtiene:

$$EmpujeTobera = 5.84[kgf]$$

Con el empuje total y el empuje de la tobera sola se puede calcular el empuje de la hélice.

$$Empuje\ hélice = (Empuje) - (Empuje\ Tobera) \quad (2.16)$$

$$Empuje\ hélice = 4.3[kgf]$$

Los cálculos efectuados se presentan en tabla 2.2.

Tabla 2.2: resultados para hélices en Z.

	Ka 3-65
Empuje total [kgf]	10.14
Empuje hélice [kgf]	4.3
Empuje tobera [kgf]	5.84

Como se puede dar cuenta, el empuje total no alcanza lo que se deseaba en primera instancia, un empuje de $16.92(N)$ para cada hélice. Esto se debe al considerar una placa cuadrada como área de contacto de la corriente, por lo que hay un sobredimensionamiento en esa consideración. Es por esto, que se realiza una prueba de empuje en ANSYS para comparar resultados. La tabla 2.3 muestra los resultados obtenidos en pruebas de empuje (en el eje Z) realizadas en ANSYS, donde se obtienen los empujes necesarios a cierta velocidad.

Tabla 2.3: empujes obtenidos en la dirección de Z.

Prueba N°	Velocidad m/s	$D(N)$
1	0.1	0.215
2	0.5	5.604
3	1	21.007

Comparando los resultados se obtiene que a $0.5(m/2)$, por simulación en ANSYS se requiere un empuje de solo $5.604(N)$ como total, por lo que la hélice que se estima se encuentra dentro del rango de empuje necesario. La gran diferencia ocurre en que en el primer caso, no se considera el modelo geométrico para obtener un Coeficiente de arrastre (C_d) y el área de proyección de este.

El modelo que se utiliza para la simulación en ANSYS se presenta en la figura 2.6 y el procedimiento para la obtención de datos se encuentra en el Anexo D.

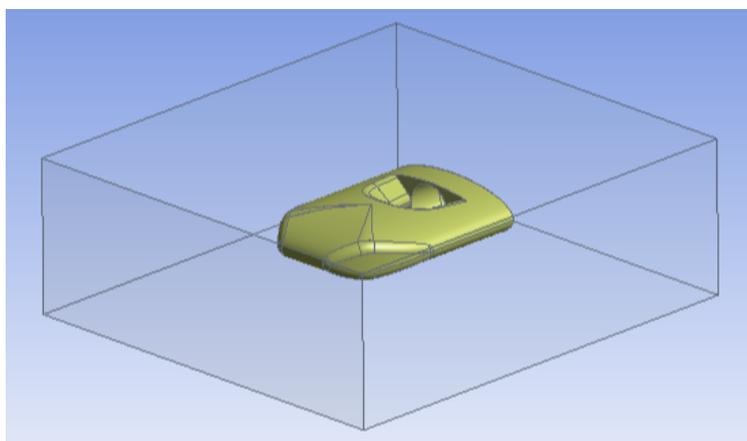


Fig. 2.6: modelo usado para simulación en ANSYS.

Definida la utilización de la hélice perteneciente a la serie Ka 3-65 que se procede a definir su geometría. Esta geometría está definida en primer término por el diámetro exterior de la hélice (D), por el número de palas (Z) y por la relación de áreas (A_e/A_o), la cual se define como la relación entre el área de las palas proyectada sobre un plano normal al eje de la hélice, dividida por el área del disco de la hélice.

En la figura 2.7 se entregan factores que determinan las distancias a bordes y espesores que permiten definir las diferentes formas de las secciones que conforman la pala de la hélice y que permiten dibujar el perfil de la misma y de la tobera asociada. La forma de proceder es encontrar la relación de radio menor y radio mayor (r/R), para así mirar en la tabla los espesores que se tienen a ciertas distancias, diseño del núcleo, etc.

Para esta serie en [15] se recomienda por norma utilizar una tobera N° 19 la cual se presenta en la figura 2.8. No obstante, en este trabajo se reemplazará esta tobera por tubos que cumplirán esa función y que se presentan en el Capítulo 3. Esto debido a las restricciones que tiene el diseño propuesto para el vehículo.

Dimensions of the K_a-screw series

<i>r/R</i>		0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
Length of the blade sections in percentages of the maximum	from centre line to trailing edge	30.21	36.17	41.45	45.99	49.87	52.93	55.04	56.33	56.44	Length of blade section at 0.6R $= 1.969 \frac{D A_E}{Z A_O}$
	from centre line to leading edge	36.94	40.42	43.74	47.02	50.13	52.93	55.04	56.33	56.44	
length of the blade section at 0.6R	total length	67.15	76.59	85.19	93.01	100.00	105.86	110.08	112.66	112.88	
Maximum blade thickness in percentages of the diameter		4.00	3.52	3.00	2.45	1.90	1.38	0.92	0.61	0.50	Maximum thickness at centre of shaft = 0.049D
Distance of maximum thickness from leading edge in percentages of the length of the sections		34.98	39.76	46.02	49.13	49.98	-	-	-	-	

Ordinates of the K_a-screw series

<i>r/R</i>	<i>Distance of the ordinates from the maximum thickness</i>											
	<i>From maximum thickness to trailing edge</i>						<i>From maximum thickness to leading edge</i>					
	100%	80%	60%	40%	20%	20%	40%	60%	80%	90%	95%	100%
Ordinates for the back												
0.2	-	38.23	63.65	82.40	95.00	97.92	90.83	77.19	55.00	38.75	27.40	-
0.3	-	39.05	66.63	84.14	95.86	97.63	90.06	75.62	53.02	37.87	27.57	-
0.4	-	40.56	66.94	85.69	96.25	97.22	88.89	73.61	50.00	34.72	25.83	-
0.5	-	41.77	68.59	86.42	96.60	96.77	87.10	70.46	45.84	30.22	22.24	-
0.6	-	43.58	68.26	85.89	96.47	96.47	85.89	68.26	43.58	28.59	20.44	-
0.7	-	45.31	69.24	86.33	96.58	96.58	86.33	69.24	45.31	30.79	22.88	-
0.8	-	48.16	70.84	87.04	96.76	96.76	87.04	70.84	48.16	34.39	26.90	-
0.9	-	51.75	72.94	88.09	97.17	97.17	88.09	72.94	51.75	38.87	31.87	-
1.0	-	52.00	73.00	88.00	97.00	97.00	88.00	73.00	52.00	39.25	32.31	-
Ordinates for the face												
0.2	20.21	7.29	1.77	0.1	-	0.21	1.46	4.37	10.52	16.04	20.62	33.33
0.3	13.85	4.62	1.07	-	-	0.12	0.83	2.72	6.15	8.28	10.30	21.18
0.4	9.17	2.36	0.56	-	-	-	0.42	1.39	2.92	3.89	4.44	13.47
0.5	6.62	0.68	0.17	-	-	-	0.17	0.51	1.02	1.36	1.53	7.81

Note: The percentages of the ordinates relate to the maximum thickness of the corresponding section.

Fig. 2.7: detalles dimensionales de hélices serie Ka. Fuente: [15].

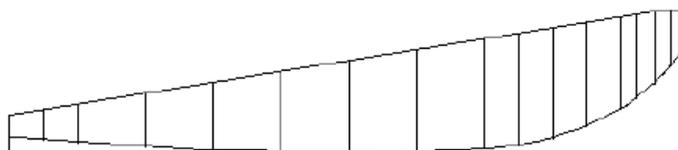


Fig. 2.8: sección tobera N°19. Fuente: [15]

2.3. Diseño sistema propulsor

De acuerdo a los cálculos obtenidos, se realiza un diseño de hélice, utilizando las relaciones de paso/diámetro. En la figura 2.9a - 2.9c se presenta la hélice resultante en conjunto al motor brushless a utilizar. El plano resultante de la hélice se puede revisar en Anexo A.6

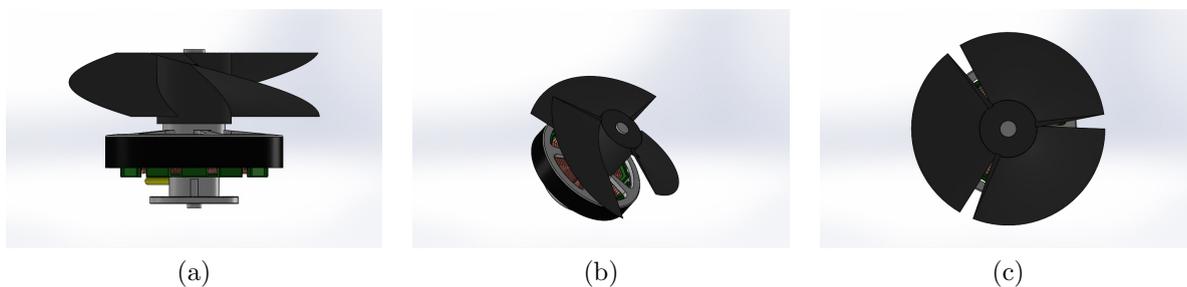


Fig. 2.9: ensamble sistema de propulsión motor-hélice. a) vista lateral, b) vista isométrica, c) vista superior.

2.4. Diseño de timón

Para realizar el movimiento de viraje o yaw se implementa un timón ubicado en la cola o parte posterior del vehículo. El ángulo de este, variará mediante el uso de un servomotor que transmite un movimiento de 90° a través de piñones cónicos. A continuación, se presentan distintas opciones de timones, además del que se incorpora al prototipo en conjunto de su diseño y una vista preliminar del ensamble de este sistema.

2.5. Tipos de timones

Existen diversos tipos de timones con distintas características. En la figura 2.10 se presenta una clasificación de estos como resumen, para posteriormente guiarse en la selección de este.

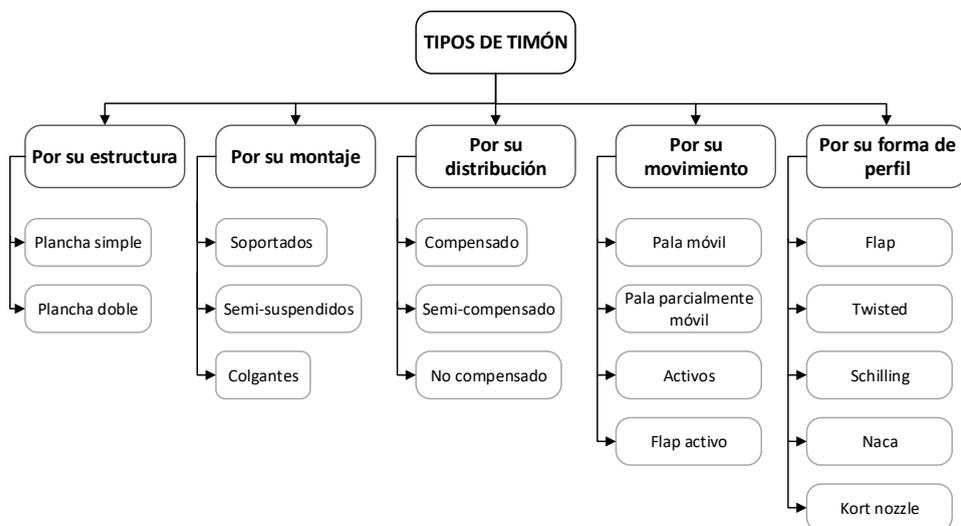


Fig. 2.10: clasificación de tipos de timón. Fuente: [17]

Principales tipos de timón usados:

- Timón compensado (Balanced rudder)

- Timón de pala (Spade rudder)
- Timón con cuerno completo (Full skeg rudder)
- Timón con cuerno semi-compensado (Semi-balanced skeg rudder)
- Timón semi-compensado antiguo (Semi-balanced rudder, aft of skeg or Deadwood)

2.6. Selección timón

Como se ha mencionado, el tipo de timón dependerá en su mayoría de la geometría del vehículo y si este tiene o no un propulsor o hélice aguas arriba o aguas abajo.

En este caso se selecciona un timón con las siguientes características:

1. Por su estructura: Plancha simple
2. Por su montaje: Soportado
3. Por su distribución: No compensado
4. Por su movimiento: Pala móvil
5. Por su forma de perfil: Naca

Lo que resulta una combinación entre un modelo Spade rudder y Full skeg rudder como se presenta en la figura 2.11.

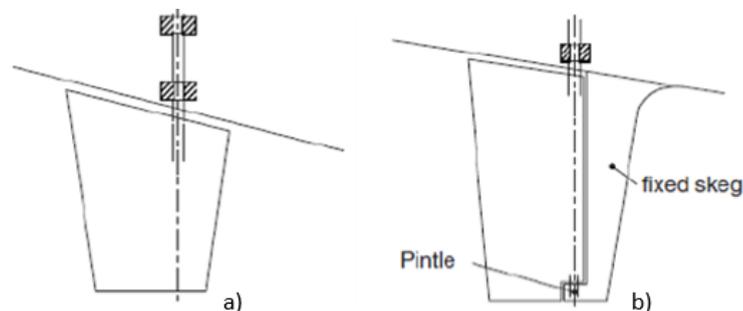


Fig. 2.11: a) spade rudder. b) full skeg rudder. Fuente: [17]

2.7. Diseño timón

El diseño del timón y el cálculo que existe para dimensionar timones no está dentro de los alcances de este trabajo, por lo que se realiza un diseño en CAD de acuerdo a la geometría y estructura del cuerpo del vehículo. Por lo tanto, se diseña en base un timón básico que cumpla la función de provocar el viraje.

VARIABLES que se consideran en los diseños de timones:

- H: altura

- T : espesor
- C : cuerda media
- $wedge$: relación de alargamiento
- t/c : (E): relación de espesor
- A_r : área del timón
- $A_r/L \cdot T$: área de deriva

De los parámetros mencionados anteriormente, solo se utiliza en el diseño de este trabajo la altura, espesor y la cuerda media.

El diseño del timón estará condicionado con el diseño de la cola del vehículo, por lo tanto la altura de la aleta del timón corresponde al diámetro de salida del propulsor ubicado en la cola. Este sistema se diseña de una manera simplificada por lo que su espesor es el mínimo necesario para que este no sufra una ruptura dado un punto de operación. Por otra parte, se define que su geometría esta basada en una de tipo NACA, ya que esta es de simple diseño y se presenta buenos resultados de maniobrabilidad [17]. Este tipo de geometría se presenta en la figura 2.12.

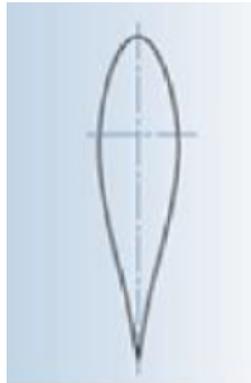


Fig. 2.12: forma de perfil NACA. Fuente: [17]

Se realiza un diseño en CAD del timón a implementar, obteniendo lo que se presenta en la figura 2.13a-2.13c. Los planos de este diseño se presentan en Anexo A.7

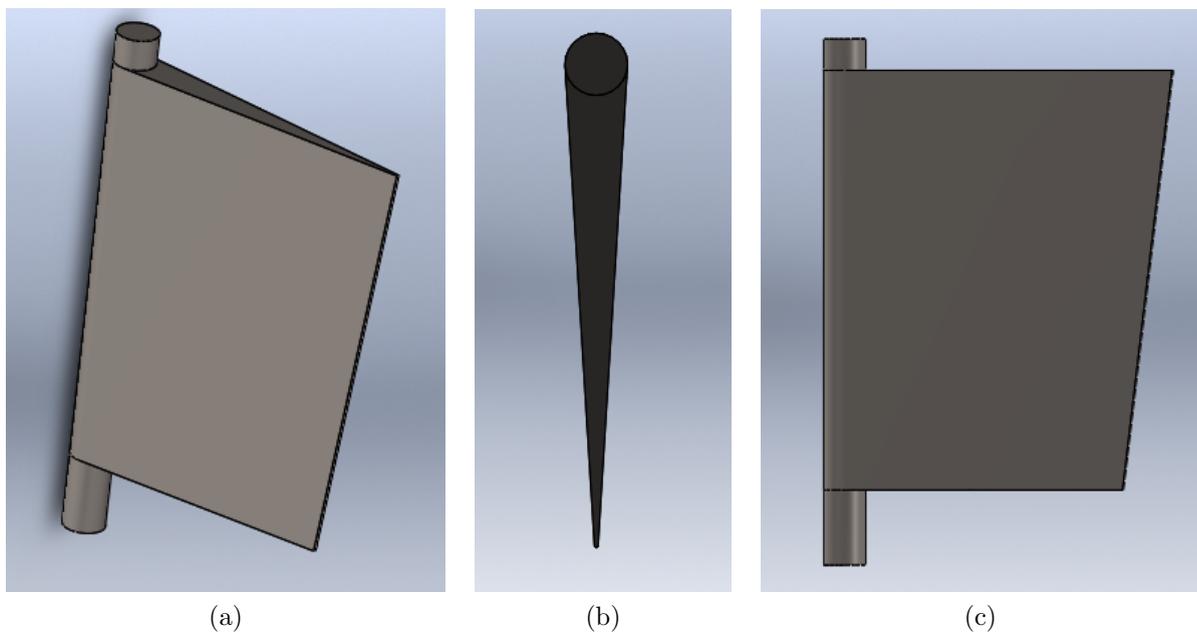


Fig. 2.13: diseño de timón realizado en CAD. a) vista isométrica, b) vista superior, c) vista lateral.

Este timón sera comandado por un servomotor FreeTech FS5106B, donde sus características pueden ser revisadas en Anexo B.5. En la figura 2.14 se presenta el servomotor a utilizar.



Fig. 2.14: Servomotor FreeTech FS5106B. Fuente: [18]

2.8. Ensamble sistema timón

El sistema de viraje o timón, consiste en un par de engranajes cónicos para transmitir el movimiento en 90° . La relación entre estos engranajes es 1:1, los que además poseen 20 dientes.

En la figura 2.15 se presenta la integración de este sistema de viraje o timón.

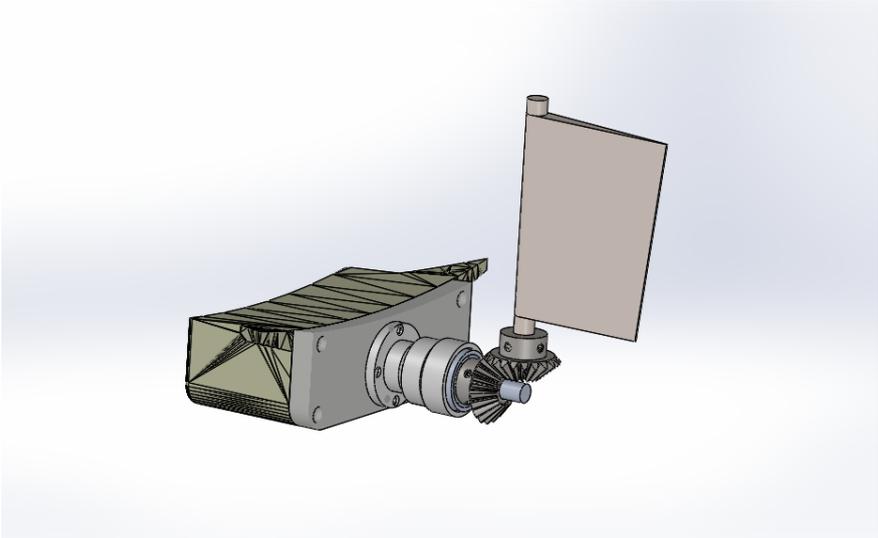


Fig. 2.15: Sistema de timón.

Por último en la figura 2.16 se muestra una vista explosionada de este sistema. En la tabla 2.4 se especifica cada elemento.

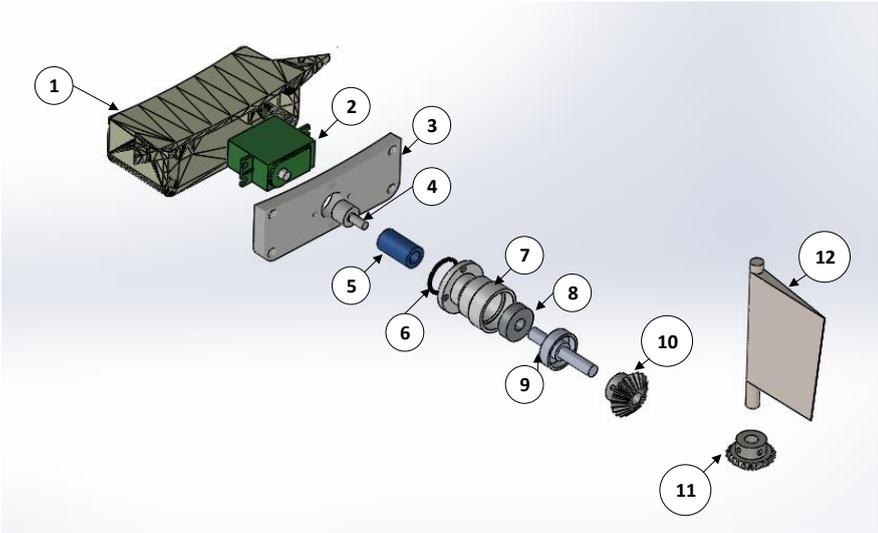


Fig. 2.16: sistema de timón con vista explosionada.

Tabla 2.4: elementos de sistema timón.

N° elemento	Nombre
1	Caja servomotor
2	Servomotor
3	Tapa de caja servomotor
4	Extensión brazo servo
5	Acople
6	O-ring
7	Soporte servomotor
8	Rodamiento
9	Eje-retén
10	Engranaje cónico
11	Engranaje cónico
12	Aleta timón

La siguiente sección comprende el diseño y proceso de fabricación de la carcasa del prototipo junto a otros elementos, que en conjunto conforman la base estructural del vehículo.

3. Diseño y fabricación de la estructura

Esta sección contempla las etapas de diseño y fabricación del vehículo submarino. La primera fase consta de un diseño en CAD que servirá como guía en la etapa de desarrollo del proceso de fabricación de la estructura (carcasa). Además, se hace énfasis en algunas etapas cruciales como la de sellado y permeabilidad, detallando como se llevará a cabo.

3.1. Diseño en CAD

De acuerdo a la información que se presenta en la figura 1.7, existe una tendencia a diseños con curvas suaves. Por otra parte, en la figura 1.6 se presentan los materiales usados mayormente en la fabricación de carcasas para móviles submarinos. De estos datos se decide diseñar un robot con curvas suaves pero no-convencional; como podría ser un vehículo submarino en forma de torpedo o un elipsoide. El diseño propuesto se presenta en la figura 3.1a.



Fig. 3.1: a) diseño inicial propuesto. b) ensamble inicial del diseño propuesto

Este vehículo se diseñó previamente en el curso de Taller de Integración 2, en el cual se hizo uso del software Inventor. El diseño y ensamble (ver figura 3.1b) de entonces contemplaba cámara de vídeo y un sistema embebido de procesamiento de imágenes. Pero debido a que esta memoria no contempla procesamiento de imágenes, no se justifica su implementación ni su adquisición.

La estructura propuesta en un inicio, posee curvaturas suaves y sólo 3 actuadores que servirán para desplazar el vehículo. Además, las dimensiones del diseño son de $300 \times 350 \times 100$ [mm]. En los siguientes apartados se muestra un re-diseño y la incorporación de un sistema de viraje como 4to actuador.

De a la información que se presenta en la figura 1.6, se decide utilizar Fibra de vidrio para fabricar la carcasa del robot. Esto debido a que el material se encuentra disponible en la facultad para la fabricación del prototipo. Por otra parte, la fibra de vidrio es un material liviano, impermeable, resistente, y su proceso de fabricación no es complejo.

Presentado el diseño propuesto se pasa a la etapa de obtención de un molde, con el fin de llevar a cabo el proceso de fabricación con fibra de vidrio y obtener la carcasa.

3.2. Fabricación de molde

En esta etapa se busca la creación de un molde para la carcasa del prototipo. Para ello se solicita ayuda a Fablab para hacer uso de la maquina CNC. Se compra madera MDF para hacer un bloque el cual la CNC mecaniza creando la superficie de la carcasa a través del archivo CAD generado de la pieza.

El archivo original a mecanizar en la CNC se divide en 4 por motivos de dimensión de trabajo de la CNC. En la figura 3.2a se presenta un contraste del primer resultado obtenido al mecanizar, donde a la derecha de la imagen se encuentra una pieza sin el afinado y a la izquierda la pieza con la etapa de afinado, además de ajuste de parámetros de la CNC mediante el software.

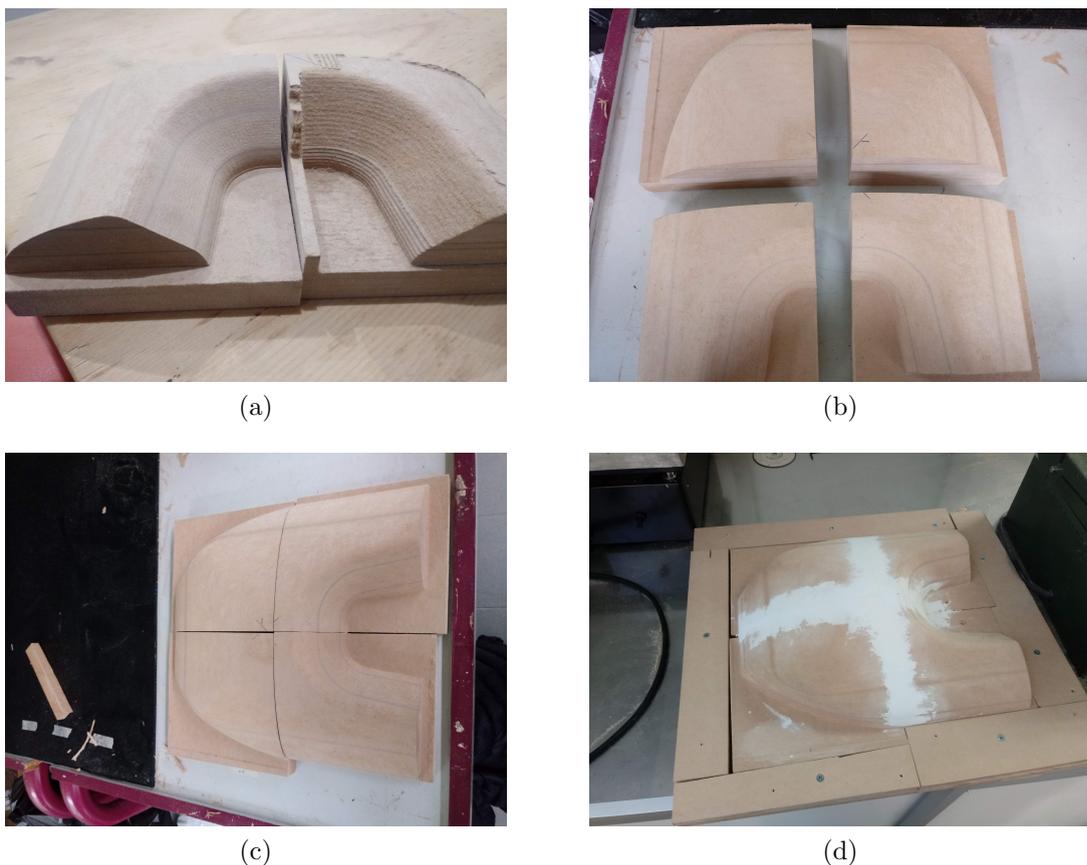


Fig. 3.2: a) comparación mecanizado entre buen y mal resultado. b) partes obtenidas a partir de CNC. c) unión de partes. d) aplicación de masilla y ensanchamiento de molde.

En la figura 3.2b se muestran las 4 piezas terminadas en la CNC, listas para unir las y avanzar al siguiente paso. La unión de estas se presenta en la figura 3.2c.

En el proceso se da cuenta de que la superficie de acabado de las piezas no era de la mejor, puesto que la madera MDF presenta un acabado no liso, una superficie con “pelusas”. Es por esto que se decide que se deberá de hacer un molde de fibra de vidrio a partir de este molde

de madera, ya que al hacerlo con el molde de MDF la pieza se adheriría de tal manera que sería imposible despegar además de quedar con algunas imperfecciones. En la figura 3.2d se le añade una base más grande al molde, para en un futuro tener una pestaña grande para retirar la carcasa. Además, se comienza a mejorar la superficie, añadiendo masilla en espacios vacíos de las uniones entre piezas y luego a toda la superficie restante. Esto proporcionará un acabado suave, como se puede ver en la figura 3.3a.

No solo se puede ver que se le ha añadido masilla por completo al molde en la figura 3.3a, sino que también se ha comenzado con la etapa de encerado. Pero previamente a esta la superficie de masilla se ha debido de lijar.

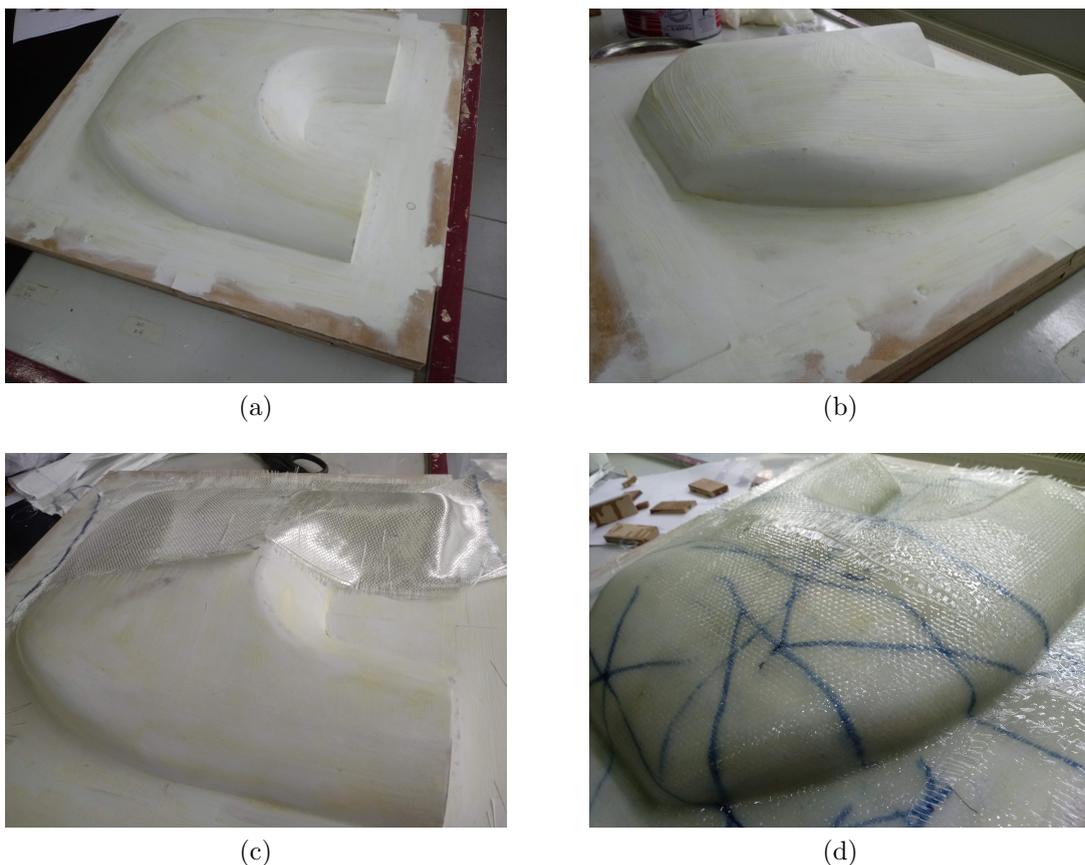


Fig. 3.3: a) suavizado superficie y primeras capas de cera. b) molde con capa de cera pulida. c) primera aplicación de tela de fibra de vidrio. d) aplicación de fibra de vidrio y resina.

En la figura 3.3b ya se ha finalizado con el encerado. Esto contemplaba 8 capas de cera desmoldante, con el fin de luego tener facilidad al desmoldar la pieza. Es importante mencionar que entre capa de cera hay una espera de 20 a 30 minutos, para que así obtener un buen secado. Una vez realizada las 8 capas de cera, se utiliza huaipe para pulir la superficie, provocando que esta quede ahora con mayor suavidad.

Luego el molde esta preparado para comenzar a fabricar el molde de fibra de vidrio. Se prepara la resina en una proporción de 2:1, resina epóxica y endurecedor respectivamente.

Posterior a esto con una brocha se aplica resina en toda la superficie del molde y se comienza a añadir trozos de fibra en la superficie, como se visualiza en la figura 3.3c. Una vez cubierta la superficie con fibra se termina de moldear la fibra al molde con suaves golpes entre la brocha y la fibra. Esto se repita hasta aplicar unas 6 a 8 capas de fibra en el molde. En la figura 3.3d se muestra cómo queda el molde cubierto con fibra de vidrio y resina (las líneas de marcador azul que se visualizan no tienen significado, los trozos de fibra utilizados estaban previamente marcados). Se debe de esperar a que la resina se seque para despegar el nuevo molde de fibra de vidrio del antiguo. Se espera 1 día y medio y se despega el nuevo molde (ver figura 3.4a y 3.4b).



Fig. 3.4: a) molde de fibra de vidrio. b) cara útil del molde de fibra de vidrio.

Se elimina los pequeños trozos de madera y masilla que se adhirieron al molde de fibra de vidrio utilizando distintos grados de lijas.

A continuación, se explica la técnica que se utiliza en la fabricación de la carcasa del submarino, para posteriormente presentar el proceso de este.

3.3. Proceso de fabricación: Infusión al vacío con fibra de vidrio y resina

En esta sección se describe el procedimiento a implementar para la fabricación del vehículo submarino, cuya técnica de fabricación consiste en la Infusión por Vacío, donde se utilizan materiales como la tela de fibra de vidrio y resina epóxica, y mediante el ingreso de este último al interior de un molde por diferencia de presión, se obtiene el material compuesto fibra de vidrio.

La infusión de vacío consiste en un proceso en el cual una bomba de vacío succiona resina hacia un laminado de fibra seca en un molde de un solo lado [81]. Para esto se coloca una membrana rígida o flexible sobre la parte superior y esta se sella alrededor de la periferia del molde. Es por eso que este proceso se considera como “proceso de molde cerrado”.

El proceso de fabricación se puede resumir y comprender en el esquema que muestra la figura 3.5 en la cual se pueden identificar elementos esenciales en el proceso; como el contenedor de resina, bomba e vacío, mangueras para inyección de resina y de vacío, molde rígido, bolsa o contra-molde, tela de fibra de vidrio, peel ply, etc.

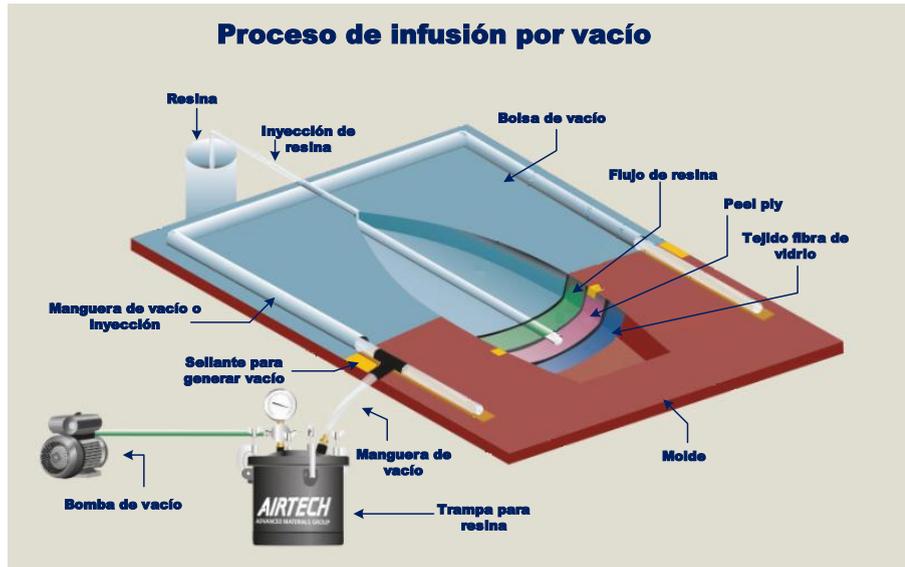


Fig. 3.5: proceso de infusión por vacío. Fuente: [19].

Para implementar el proceso se necesita de un molde de la estructura deseada para luego sellarla mediante una bolsa. Esta bolsa o membrana se interconecta mediante mangueras, que por un lado contienen el recipiente con resina y la bomba que generará el vacío. Cabe destacar que la bolsa debe estar sellada herméticamente, de lo contrario no se generará el vacío requerido para que la fibra quede comprimida.

Es recomendable ubicar el conducto de la resina en un punto central y simétrico del molde, así, conectando a los extremos la bomba de vacío, la resina se distribuye por el molde de forma homogénea y equilibrada en todas las direcciones, penetrando la tela de fibra de vidrio y completando en gran medida el proceso de fabricación. En la figura 3.6 se presenta un esquema que describe lo anteriormente mencionado.

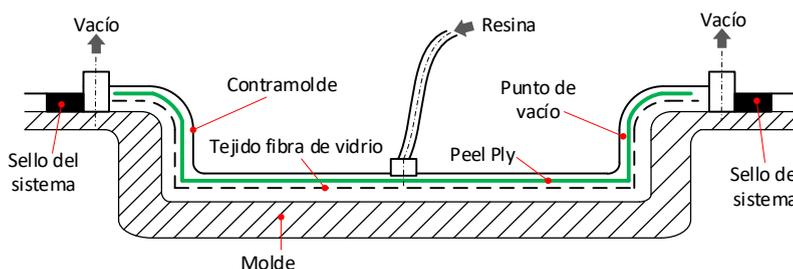


Fig. 3.6: vista seccionada de proceso general de infusión por vacío.

En algunos casos, no suele aplicarse la estrategia que se describe en la figura 3.6. Esta varía según las condiciones del proyecto, específicamente la geometría del molde. Para el caso

particular de este proyecto la estrategia será generar el vacío en un punto central e inyectar resina en la periferia del molde como se presenta en la figura 3.7.

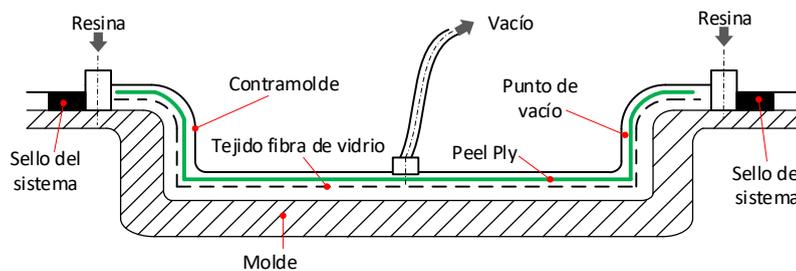


Fig. 3.7: vista seccionada de proceso de infusión al vacío a implementar.

Explicado el método de fabricación a implementar, a continuación se presenta el proceso práctico de este.

3.4. Fabricación de carcasa

En esta etapa se da comienzo al proceso de fabricación de las carcasas para el prototipo, ya que se cuenta un molde rígido y adecuado. En este punto del proceso, se decide fabricar 2 carcasas simétricas, por lo que el diseño inicialmente propuesto sufre cambios. Esto se decide por factores de tiempo e insumos.

Para empezar, primero se encera y pule la cara interna del molde. Se recortan trozos de fibra de vidrio del tamaño necesario para cubrir la cara interna del molde, en este caso se utilizan 8 trozos (8 capas) de aproximadamente 40x40 cm. Además, se corta un trozo de peel ply más grande que los de fibra, aproximadamente de 55x55 cm. Esta tela debe ser más grande, ya que en la última parte del proceso cuando se deba despegar la pieza, será el peel ply del cual tiraremos para comenzar a despegar. También, se añade un trozo de malla como se aprecia en la figura 3.8a. Esta ayuda a la resina que fluya con facilidad y no se estanque producto del vacío.

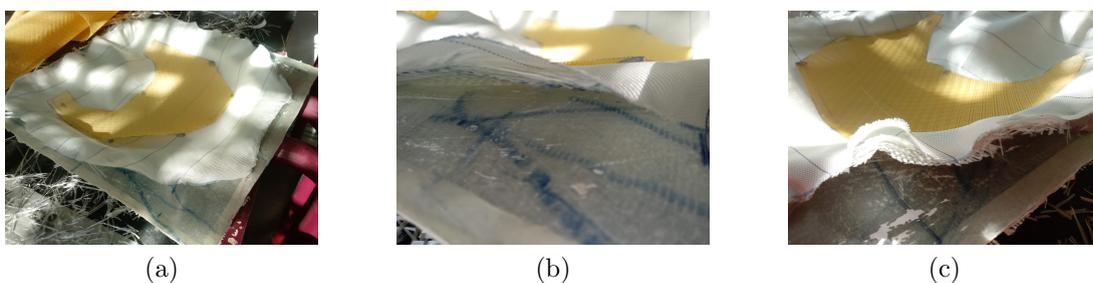


Fig. 3.8: a) capas de fibra de vidrio, peel ply y malla. b) vista cercana lateral de las capas de material en el molde. c) vista lejana lateral de las capas de material en el molde.

En la figura 3.8b y 3.8c se muestran distintas vistas de la disposición espacial de los materiales mencionados anteriormente. Luego, con la manguera helicoidal se bordea el peel ply

y se va adheriendo a su vez al molde con la ayuda del pegote. También se instala el conector tipo T a los extremos de la manguera como se ve en la figura 3.9a.



Fig. 3.9: a) adhesión de mangueras, conexión T y peel ply al molde. b) vista cercana de la adhesión de algunos insumos al molde mediante el pegote.

En la figura 3.9b se puede ver de más cerca como el pegote ayuda a adherir la manguera y el conector tipo T. Luego, se instala la bolsa de vacío adhiriéndose a los bordes del molde con la ayuda del pegote o sealant tape, para provocar un aislamiento. En la figura 3.10a se puede observar lo anteriormente descrito, además de una prueba de vacío que se realiza sin inyectar resina teniendo el propósito de comprobar que no hay filtro de aire en el molde. De no haber filtro de aire se continúa con el proceso y se inyecta resina generando el vacío. La bolsa de vacío se compacta sobre el molde y provoca que las fibras queden compactadas.



Fig. 3.10: a) instalación de bolsa de vacío y prueba de vacío. b) conexión de manguera de vinilo a conector tipo T para la inyección de resina al molde. c) inyección de resina al vacío. d) vista cercana de inyección de resina al vacío.

En la figura 3.10b se muestra como la manguera de vinilo es usada para la inyección de resina al conector tipo T y como este a su vez la distribuye hacia las mangueras helicoidales que bordean el molde. En la figura 3.10c y 3.10d se aprecia una mejor vista de la inyección de resina al vacío, fluyendo esta hacia el medio, en donde se encuentra otra manguera generando vacío, conectada con un niple. En la figura 3.11a se muestra el compresor utilizado para generar el vacío y en la figura 3.11b el acumulador de succión que tiene por objetivo evitar el paso de resina hacia el compresor.

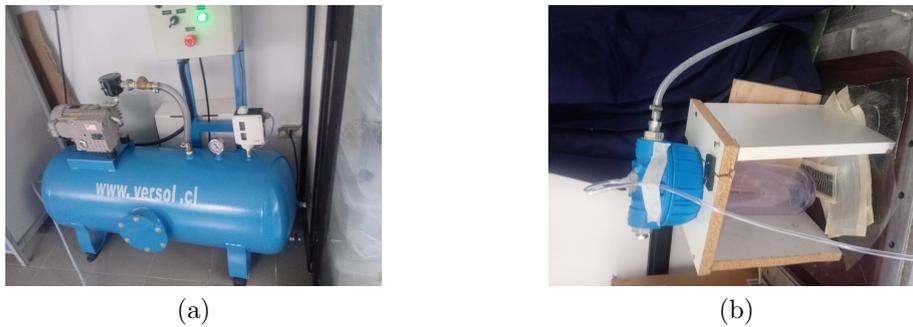


Fig. 3.11: a) compresor utilizado para generar vacío. b) acumulador de succión.

Una vez que se realiza la inyección de resina, se estrangulan las mangueras para mantener la presión interna del molde y se deja reposar el molde con la futura carcasa por 1 día o 2 días dependiendo de la temperatura ambiente. Luego de que se encuentre seco, se desprende la carcasa obteniendo un resultado como el que se aprecia en la figura 3.12a. Después se repite el proceso para obtener a otra carcasa simétrica, como se observa en la figura 3.12b.



Fig. 3.12: a) carcasa de fibra de vidrio. b) carcasas simétricas.

Finalmente, obtenidas las carcasas ya se puede comenzar el paso de mecanizado.

3.5. Mecanizado de carcasa

Dada las carcasas obtenidas en la etapa anterior, es necesario dar forma a la pestaña que rodea al prototipo dejándola de 1.5 cm aproximadamente. Se decide dejar estos perfiles para en un futuro utilizarlos como junta de sellado entre carcasas.

Para este mecanizado se utiliza la sierra circular de banco y se recortan excesos de pestaña. Los resultados se pueden ver en la figura 3.13a.



Fig. 3.13: a) mecanizado de pestañas en carcasas. b) vista isométrica de carcasas.

En la figura 3.13b se puede comenzar a visualizar como quedará el prototipo a futuro, siendo las carcasas simétricas. Luego, se realizan perforaciones en una carcasa de prueba utilizando 2 medidas posibles; agujero de 83 mm de diámetro y 73 mm de diámetro. En la figura 3.14 se presentan los agujeros propuestos, y se decide optar por el agujero de 83 mm de diámetro, puesto que los motores y las hélices se encuentran dentro del rango de ese diámetro. Es importante mencionar que si bien se utilizan coplas de 83 mm para perforar, la perforación resulta ser un poco más grande, 85.90 mm aproximadamente.



Fig. 3.14: comparación de agujeros.

3.6. Encamisado agujeros de carcasa

Una vez realizada la etapa de agujeros, se pasa a la etapa de encontrar una estrategia de encamisado para estos. Lo más rápido es buscar algún tipo de tubo. Se indaga entre los más comunes en el mercado, los tubos PVC.

Según la norma el tubo de PVC más cercano en diámetro a lo requerido es de 90 mm, utilizado en electricidad. Por lo tanto, se debe disminuir el diámetro de los extremos para que estos coincidan con lo señalado en el apartado anterior.

Utilizando una pistola de calor se deforman los extremos de 2 tubos PVC de 90 mm de diámetro, como se presenta en la figura 3.15a. Esta deformación se realiza sobre una matriz rígida con un diámetro menor al original del tubo. En este caso se utiliza el cuello de una botella

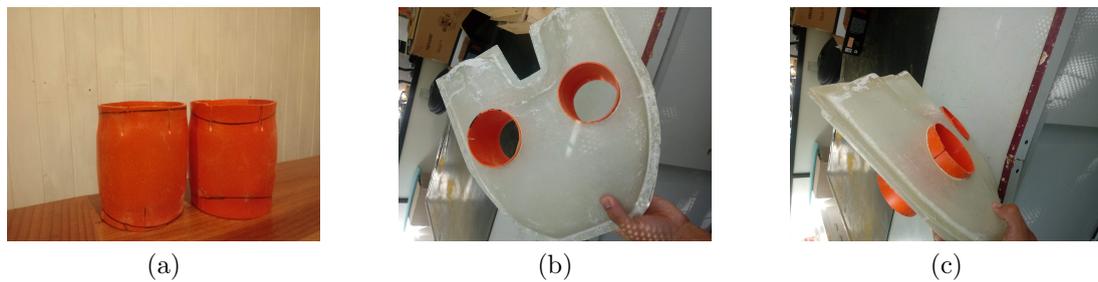


Fig. 3.15: a) deformación de tubos PVC. b) encamisado de carcasas con tubos PVC (vista frontal). c) encamisado de carcasas con tubos PVC (vista lateral).

Luego se instala el encamisado para el prototipo, obteniendo buenos resultados como se presenta en las figuras 3.15b y 3.15c. En este punto del proyecto se decide realizar un re-diseño del prototipo, ya que se realizaron cambios estructurales durante el desarrollo. En la figura 3.16a se presenta un rediseño.

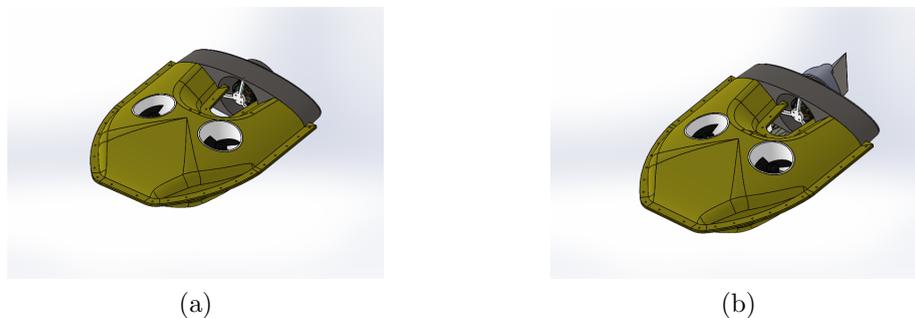


Fig. 3.16: a) rediseño de prototipo. b) rediseño de prototipo junto con el sistema de timón.

Por otra parte, se incorpora un sistema de viraje, el cual en un comienzo de propuesta de diseño no estaba contemplado. La figura 3.16b presenta el rediseño junto con el sistema de timón.

A continuación se presentan las piezas a diseñar en impresora 3D.

3.7. Impresión 3D piezas

En esta etapa se imprimen las piezas previamente diseñadas en Inventor y Solidworks. Las piezas que se imprimen corresponden a:

- Acople cola (figura 3.17a).
- Aleta de timón (figura 3.17b).
- Caja servomotor (figura 3.17c).
- Cola (figura 3.17d).
- Extensión brazo servo (figura 3.17e).

- Guía de soporte servomotor (figura 3.17f).
- Hélice (figura 3.17g).
- Soporte para motor vertical (2 unidades (figura 3.17h)).
- Soporte para motor de la cola (figura 3.17i).
- Soporte servomotor (figura 3.17j).
- Tapa de caja servomotor (figura 3.17k).

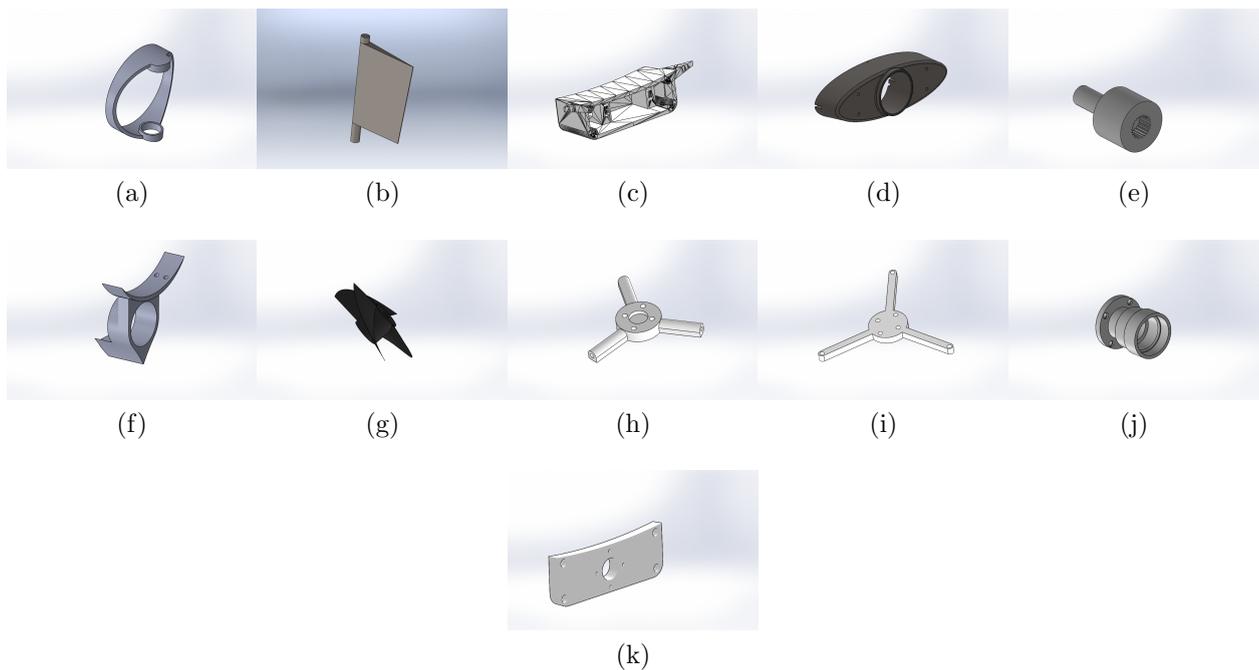


Fig. 3.17: piezas de impresión 3D.a) acople cola. b) aleta de timón. c) caja servomotor. d) cola. e) extensión brazo servo. f) guía de soporte servomotor. g) hélice. h) soporte para motor vertical. i) soporte para motor cola. j) soporte servomotor k) tapa de caja servomotor.

Los planos de cada pieza pueden encontrarse en el Anexo A.

3.8. Ensamble

Una vez obtenidas las piezas de impresión 3D se procede a ensamblar, ya que también se cuentan con otros elementos como pernos, insertos metálicos y los 3 motores. En la figura 3.18a se presentan los elementos a ensamblar de la estructura principal o casco del prototipo, donde muestra la carcasa con el encamisado, la cola del dispositivo, motores, pernos, soporte para motores y hélices.



Fig. 3.18: a) conjunto de piezas a ensamblar. b) configuración de encamisado y soporte motor. c) ensamble de hélice-motor. d) ensamble del soporte motor a la cola, motor y hélice.

Para ensamblar se comenzó con instalar los soportes para motor en el encamisado, para ello se hacen los agujeros pertinentes y luego se fijan con pernos M3. En la figura 3.18b se puede ver cómo es la disposición de la hélice en un motor, en donde este atraviesa la hélice con un eje con rosca. Ahora se puede ensamblar ese motor en el soporte para motor que se encuentra en el encamisado. Luego se instala el soporte para motor de la cola y todo lo que pertenece al lugar, como el motor y hélice de cola. Se puede ver en la figura 3.18c. En la figura 3.19a y 3.19b se presentan los elementos impresos a ensamblar correspondientes al sistema de timón. A diferencia de lo presentado en el Capítulo 2, se incluye y se diseña en esta etapa un elemento que se acopla a la cola del vehículo, esto con el objetivo de que el sistema sea desarmable.

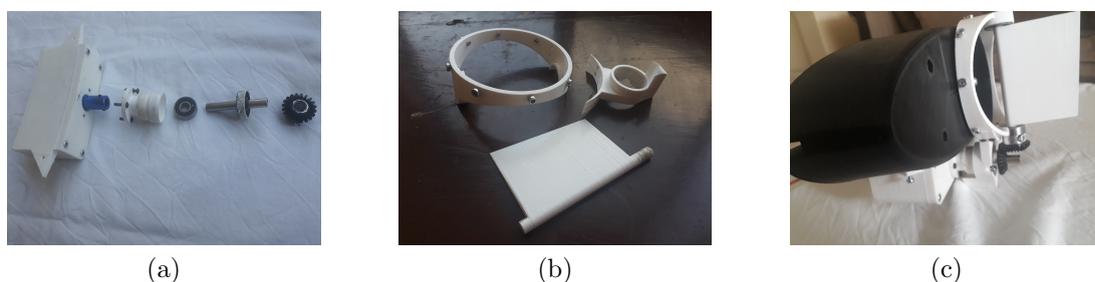


Fig. 3.19: a) piezas impresas 3D para transmisión de movimiento timón. b) piezas impresas 3D para el acople de timón en cola. c) sistema de timón acoplado en cola.

Este sistema se acopla a la cola, y resulta tiene como resultante lo que se presenta en la figura 3.19c.

A continuación, se explica y muestra cómo la estructura principal del prototipo (carcasa) evitará el filtro de agua.

3.9. Sellado y permeabilidad

Uno de los puntos más críticos de este trabajo es la permeabilidad del vehículo, ya que la posible filtración de agua al interior de este, provocaría daños en los dispositivos electrónicos entre otras cosas. Es por eso que en esta sección, se procede a explicar las estrategias de sellado en distintos puntos de fugas, aspirando a una estructura hermética.

Los puntos de fuga en este trabajo se dividen en 3 partes; la junta de ambas carcásas (figura 3.20a), la junta entre la carcasa y encamisado (figura 3.20b), y por último el pasaje entre el cableado de motores al interior del vehículo (figura 3.20c).

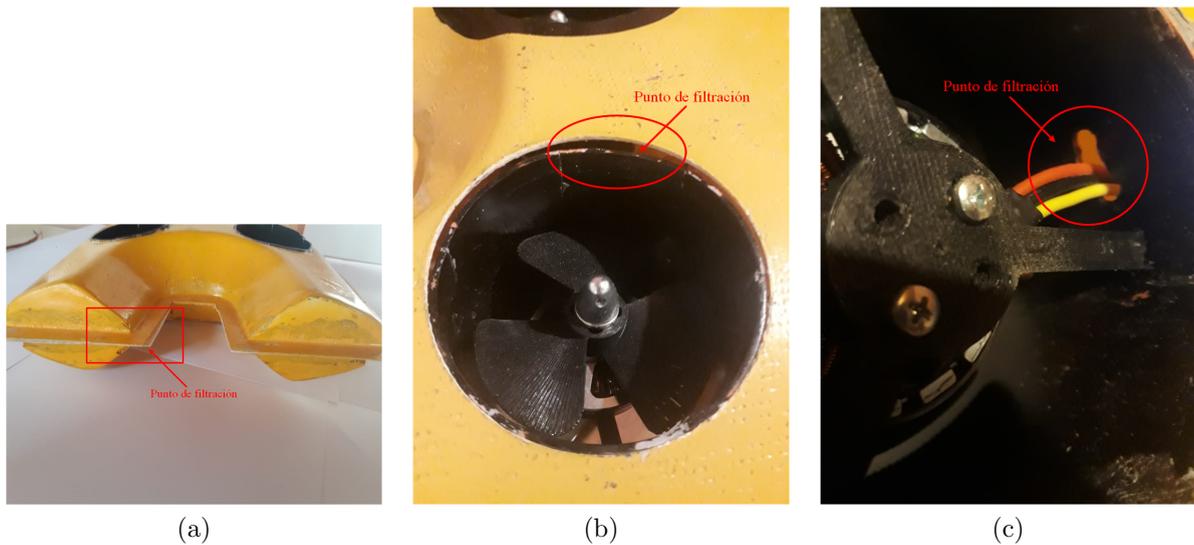


Fig. 3.20: a) junta entre carcasa. b) junta entre carcasa y encamisado. c) pasaje entre cableado de motores e interior estructura.

Las estrategias a implementar para cada problemática se describen a continuación.

3.9.1. Sellado entre carcásas

Para esta problemática se utiliza una empaquetadura tipo esponja del fabricante Cruzeiro (ver figura 3.21a). La idea es cubrir la pestaña de la carcásas con esta junta. No obstante, la trayectoria de la pestaña no es estandar, por lo que se deberá adaptar esta empaquetadura al perfil.

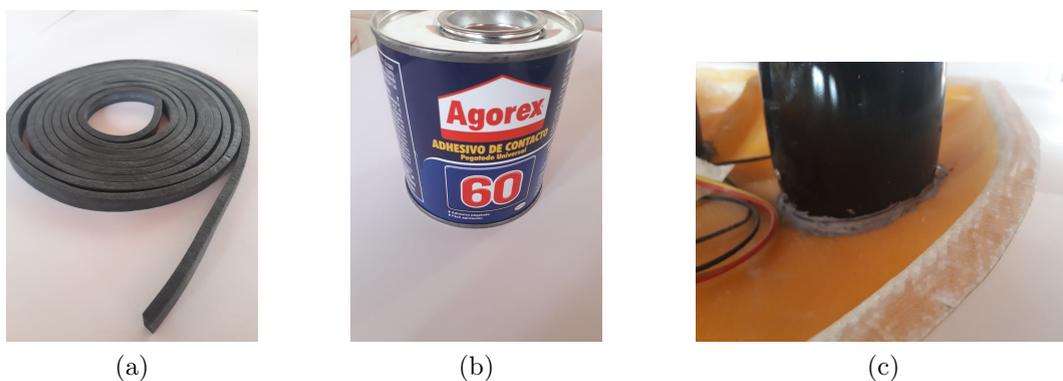


Fig. 3.21: a) empaquetadura a utilizar en el sellado entre carcásas. b) adhesivo Agorex usado en el pegado de junta y carcasa. c) perfil de carcásas sobre el cual se trabaja la junta.

Para la adhesión de la empaquetadura se utiliza Agorex (ver figura 3.21b), utilizandola como base en la pestaña.

En la figura 3.21c se muestra el perfil o pestaña en el cual se implementará la empaquetadura .

Los resultados obtenidos se visualizan en las figuras 3.22a-3.22b. Como se puede observar, la empaquetadura se adapta al perfil. Cabe destacar que esto se implementa solo en una de las carcásas, siendo esta la carcása inferior.

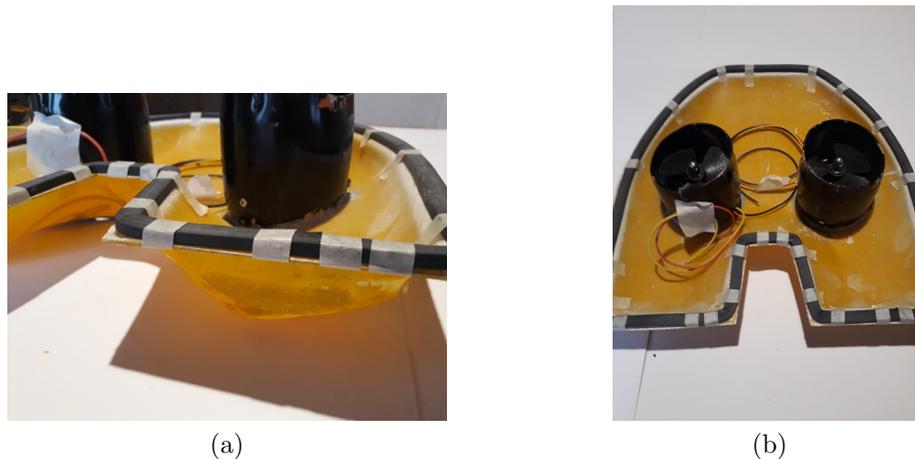


Fig. 3.22: a) vista isométrica implementación junta. b) vista superior implementación junta.

En las figuras 3.23a-3.23d se presentan distintas vistas de los resultados obtenidos, además de que se presenta cómo se cierra o juntan ambas carcásas, utilizando pernos M3.

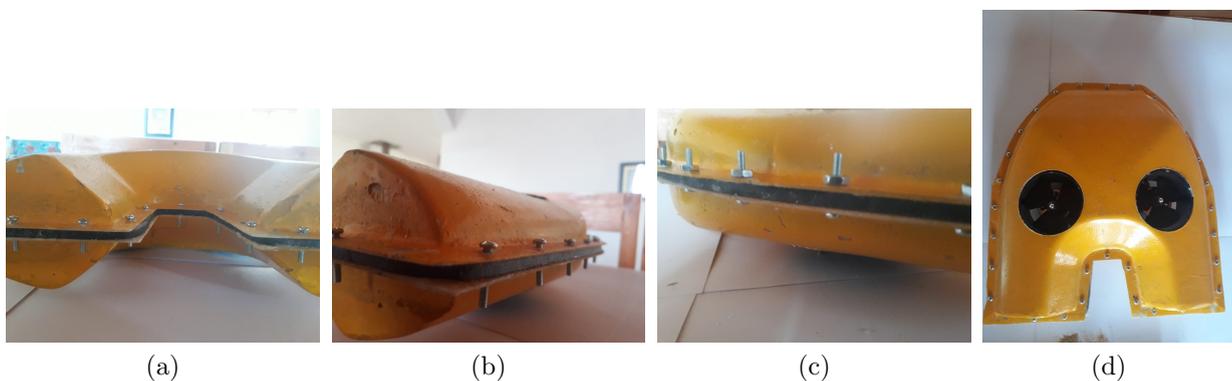


Fig. 3.23: a) vista posterior junta implementada. b) vista posterior en esquina junta implementada. c) vista lateral junta implementada. d) vista superior junta implementada.

3.9.2. Sellado carcása-encamisado

Para esta solución se consideran los filtros que se generan entre el tubo PVC y ambas carcásas. Sin embargo, solo se necesita que una de las carcásas este empotrada junto a los tubos, ya que la contraparte se necesita quitar eventualmente para trabajar y modificar la electrónica interior.

Para empotrar lo que es la carcasa base o inferior junto con los tubos, se utiliza silicona gris LOCTITE, además como método de sellado para el agua. Esta se usa por su durabilidad y su gran capacidad a la resistencia en torque. Además, se debe recalcar que al ser este proyecto un prototipo, no se busca una solución permanente, debido a una eventual modificación en el diseño o ajustes en los componentes. En la figura 3.24a-3.24b se muestra el resultado obtenido de la union de estos componentes.

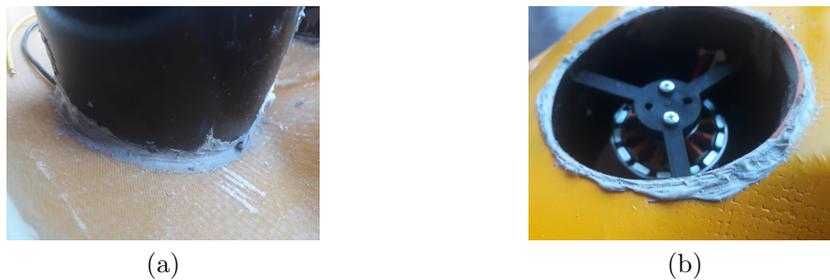


Fig. 3.24: a) vista interior sellado. b) vista exterior sellado.

La parte superior (carcasa) se utiliza sin un sello permanente o parcial, ya que constantemente se necesita abrir, y dado el diseño actual del prototipo, se debe buscar una solución de diseño para esto. Por lo tanto, el prototipo se cierra con la junta y pernos, y si se necesita introducir al agua para una prueba, se le añade silicona acética blanca. Luego esta se puede desprender con facilidad.

3.9.3. Sellado cableado-interior

Al igual que el apartado anterior, para el sellado de cables que van de los motores al interior del prototipo, se utiliza silicona acética blanca. Estos elementos no necesitan estar removiendose constantemente, salvo si se necesitan revisar las bobinas de los motores brushless, o realizar algun cambio en ese sector. En la figura 3.25 se presenta lo explicado.



Fig. 3.25: sellado interior de cables.

Explicadas las estrategias de sellado contra el filtro de agua, se continúa en la siguiente sección el detalle de los componentes y dispositivos electrónicos a utilizar en el proyecto. Además se presentará el ensamble definitivo del vehículo, el cual integra todos los componentes y sus conexiones.

4. Componentes y dispositivos electrónicos

Este capítulo abarca los componentes electrónicos a utilizar en el vehículo submarino. Se explica cuales y porqué se implementan y como estos funcionan en conjunto. Además, se evalúa el consumo energético del dispositivo para seleccionar un tipo de fuente de alimentación. Finalmente, se representa la integración de estos dispositivos a la estructura vista en el Capítulo 3.

4.1. Dispositivo de control

Para procesar la información y realizar instrucciones programadas, el robot necesita de un controlador. En este caso, se requiere controlar las velocidades de los propulsores y servomotor para que el vehículo se desplace en alguna dirección. A su vez, la información obtenida será proporcionada mediante sensores de posición, orientación, etc.

Como opciones de controladores encontrados en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca se tiene a la placa electrónica Arduino. Se disponen varios modelos de este micro-controlador programable como; Arduino Uno, Mega y Due. Sin embargo, se hace elección de la placa Arduino Due (figura 4.1) para el desarrollo de este proyecto.



Fig. 4.1: Arduino DUE. Fuente: [20]

Se selecciona este dispositivo debido a que es el que posee la velocidad de muestreo más rápida (84MHz) y además tiene una gran capacidad de almacenaje (96Kb), por lo que puede soportar y procesar códigos extensos con una gran cantidad de variables. Por otra parte, la cantidad de pines (54 digitales y 12 analógicos) y periféricos no son un limitante para futuros trabajos.

En la tabla 4.1 se hace una comparativa de características entre los arduinos mencionados. Estos se comparan en voltaje de alimentación, cantidad de pines analógicos y digitales, capacidad de almacenaje, dimensiones, velocidad de procesador, etc.

Tabla 4.1: comparación de características entre placas Arduino disponibles para el proyecto.

Especificación	Arduino UNO	Arduino Mega	Arduino DUE
Microcontrolador	ATmega328P	ATmega2560	AT91SAM3X8E
Voltaje	5V	5V	3.3V
Input Voltaje (recomendado)	7-12V	7-12V	7-12V
Voltaje (límite)	6-20V	6-20V	6-16V
Digital (I/O) Pins	14	54	54
PWM Digital (I/O) Pins	6	6	-
Pins entrada analógica	6	6	12
Pins salida analógica	-	-	2 (DAC)
DC corriente por I/O Pin	20 mA	20 mA	130mA
DC corriente para 3.3V Pin	50 mA	50 mA	800mA
Memoria Flash	32 Kb	256 Kb	512 Kb
SRAM	2 Kb	8 Kb	96 Kb
EEPROM	1 Kb	4 Kb	-
Velocidad reloj	16 MHz	16 MHz	84 MHz
Longitud	68.6 mm	101.52	101.52 mm
Ancho	53.4 mm	53.3	53.3 mm
Peso	25 g	37 g	36 g

La estrategia con Arduino DUE es procesar la información obtenida del sensor de unidad de medida inercial, controlando la inclinación del vehículo con el objetivo de desplazarse en algún eje. Este movimiento se logra enviando una señal desde la placa Arduino hacia los controladores o drivers utilizado en cada motor, para que estos giren con cierta velocidad, alcanzando una posición deseada. En este punto se asume que el robot conoce las coordenadas de su volumen de trabajo, ya que en un caso real y de puesta en marcha, el volumen de trabajo debiera ser conocido por medio de algún sensor que pueda realizar un "mapping" [82] del espacio.

4.2. Drivers motor

Debido al uso de motores brushless en el proyecto se necesitarán controladores de velocidad para este tipo de motores llamados ESC (Electronic Speed Control). Estos son utilizados en general en proyectos de Drones. No obstante, en la mayoría de los casos estos no están diseñados para invertir el giro del motor en un instante. Para esto, se encuentran ESC que realizan este trabajo en el rubro de robótica submarina, pero son costosos y se encuentran en el mercado internacional. Por otra parte, existen controladores que son económicos y cumplen con lo requerido.

En la figura 4.2a y 4.2b se presentan los controladores mencionados anteriormente, los

cuales cumplen la misma función, con diferencias económicas y calidad.

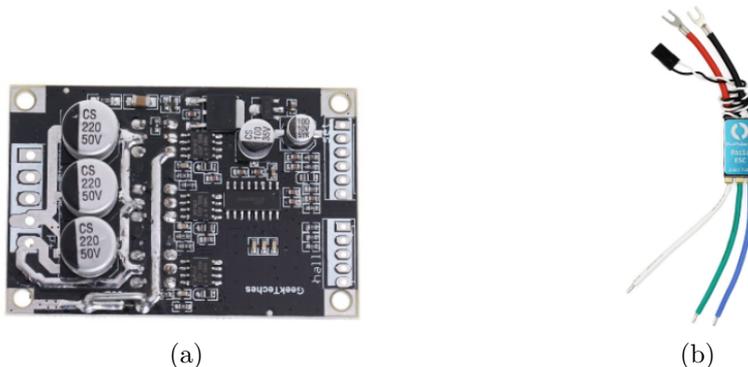


Fig. 4.2: a) controlador motor brushless tipo tarjeta [21] . b) ESC con inversor de giro [22].

Se adjunta en la tabla 4.2, características y precios por los que se pueden encontrar estos controladores en el mercado.

Tabla 4.2: características controladores motor brushless . Fuente: [21] [22]

Especificación	Tarjeta Control Brushless	ESC (inversión de giro)
Voltaje funcionamiento	12-36V	7-26V
Corriente funcionamiento	$\leq 15A$	$\leq 30A$
Potencia del controlador	500W	
Voltaje de velocidad	0.1-5V	
Control dirección	sí	sí
Tamaño	6.3x4.2cm	3.5x1.71cm
Precio	\$ 7.000	\$ 21.000
Proveedor (sitio web)	Aliexpress [21]	Robotshop [22]

Se elige la tarjeta de control brushless (figura 4.2a) en vez del tipo ESC por economía, ya que se necesitan 3 de estos dispositivos. sus especificaciones técnicas pueden encontrarse detalladas en el Anexo B.3. Esta tarjeta, es más grande que la ESC de la figura 4.2b y se debe implementar de tal manera que ocupe el menor espacio al interior del prototipo. Además, posee una salida de 5V con lo que permite la alimentación de Arduino u otros futuros sistemas.

4.3. Sensor

En cuanto a sensores, en este proyecto se considera unicamente una IMU (Inertial Measurement Unit) según los alcances mencionados en el Capítulo 1. El objetivo de este sensor es enviar la información de roll, pitch y yaw al microcontrolador (Arduino DUE). El proceso de estas variables permitirán realizar un control interno de orientación o inclinación del

vehículo. Esto último se detalla posteriormente en el Capítulo 6. En la figura 4.3 se presenta la IMU que se usa en el prototipo.



Fig. 4.3: MPU 6050. Fuente: [23]

Las especificaciones técnicas de este sensor se pueden encontrar en el Anexo B.4.

Por otra parte, un sensor importante a considerar para futuros trabajos es el sensor del volumen de trabajo. En el estado del arte (ver Capítulo 1.2.5) se mencionan 3 tipos de estos sensores de posición X , Y y Z . Por tanto, es importante mencionar que de una futura puesta en marcha se necesitará contemplar este tipo de sensores.

4.4. Conector impermeable interior-exterior

El proyecto contempla un prototipo de robot submarino ROV (Remotely Operated Vehicle), por lo tanto la comunicación es alámbrica y este puede ser operado remotamente. El vehículo debe ser cableado desde el exterior hasta su interior para futuras instrucciones o incorporación de un mando para operar. Otra opción es una fuente de alimentación que se encuentre al exterior y necesite cablearse, o por otra parte una futura incorporación de cámara de video y el monitoreo de esta.

Para esto, se necesita de un conector impermeable que permita enlazar los dispositivos del interior del vehículo con el exterior.

En el mercado se encuentran diversos conectores, de los cuales se selecciona el presentado en la figura 4.4.



Fig. 4.4: conector resistente al agua modelo SP28-6S. Fuente: [24]

Las características y especificaciones técnicas de este dispositivo se detallan en el Anexo B.1.

4.5. Alimentación

Para implementar los dispositivos que se han mencionado, se deberá alimentar a estos con una fuente de energía, ya sea una fuente externa al vehículo o interna.

En el Capítulo 1 se hace una revisión bibliográfica de las distintas opciones que existen para alimentar a un dispositivo como un ROV submarino, donde estas varían según las necesidades en tiempo de navegación, espacio disponible, potencia, etc. Por lo tanto, se comienza haciendo un dimensionado del dispositivo, en cuanto a consumo, espacio, factor económico, disponibilidad en el mercado.

4.5.1. Consumo eléctrico

Para seleccionar una fuente de alimentación se comienza detallando el consumo de cada dispositivo a implementar. Los detalles de consumos de estos dispositivos se pueden revisar en el Anexo B. En la tabla 4.3 se presenta la información de la corriente máxima permitida en los dispositivos.

Tabla 4.3: corriente permitida de dispositivos.

Dispositivo	Cantidad	Consumo (A)
Arduino DUE	1	75 (mA)
Motor brushless	3	10,7 (A)
Controlador Motor	3	0-15 (A)
Servomotor	1	0.9 (A)
IMU	1	3.8 (mA)

De la información en la tabla se adopta como relevante la información del motor, pues es el dispositivo que más energía consumirá. En el Anexo B.2 se señala que el motor consume $149.8(W)$ al operar con $10.7(A)$ y $14(V)$. Con estos datos, se procede a calcular el tiempo de navegación estimado del vehículo dada una batería de $2200(mAh)$.

Considerando esta batería y los datos del motor:

$$\text{Consumo de un motor al máximo: } 11.1(V) * 10.7(A) = 118.77(W)$$

$$\text{Consumo total: } 118.7(W) * 3 = 356.1(W)$$

$$\text{T tiempo estimado de navegación: } T = \frac{E}{P} = \frac{2.2(Ah) * 11.1(V)}{356.1(W)} = 0.07(h) = 4.11(min)$$

Se debe tener en consideración, que el cálculo anterior se realiza a modo de ejemplo utilizando una capacidad de batería de $2200(mAh)$ y con los motores a máxima capacidad. Por lo tanto, el tiempo de navegación será mayor si se utilizan valores promedios de corriente (A) del motor y una batería con mayor capacidad.

4.5.2. Selección de batería

De los cálculos y estimaciones realizadas anteriormente se procede a seleccionar baterías que se encuentran en el mercado, preferentemente se buscan de tipo Lipo debido a que entregan gran cantidad de potencia en un periodo reducido de tiempo. No obstante, también se cotiza por batería Li-ion, ya que estas pueden configurarse en un banco de baterías dada especificaciones requeridas. En la tabla 4.4 se presenta una cotización de baterías disponibles afín con el proyecto.

Tabla 4.4: comparación de baterías.

Modelo	Volaje	Tecnología	Capacidad	Tasa de descarga	Precio	Sitio web
Reedy Wolf-pack Gen2 3S	11.1(V)	Lipo	4500mAh	35C	\$64.990	https://n9.cl/4s0n
Reedy Wolf-pack 3S	11.1(V)	Lipo	3000mAh	30C	\$48.990	https://n9.cl/a93b
Gens Ace Adventure 3S	11.1(V)	Lipo	2200mAh	50C	\$35.990	https://n9.cl/hse4
Gens Ace 3S	11.1(V)	Lipo	2200mAh	25C	\$27.990	https://n9.cl/nfxfn
18650 Recargable	3.7(V)	Li-ion	2600mAh	1.5C	\$6.890	https://n9.cl/seft

Como se puede ver en la tabla 4.4, se cotiza una batería del tipo Li-ion presentada como una unidad (ver figura 4.5a). Para el uso de esta en el proyecto se debería configurar un banco de estas baterías. Esto quiere decir que se podría conectar en serie 3 baterías para obtener una fuente de 11.1(V) y 2600mAh. Luego, para aumentar la capacidad de la batería, se hace lo mismo con otro pack y estos se conectan en paralelo para aumentar su capacidad a 5200mAh. Este proceso se puede replicar para continuar aumentando la capacidad de la fuente como se presentan en la figura 4.5b a modo de ejemplo.

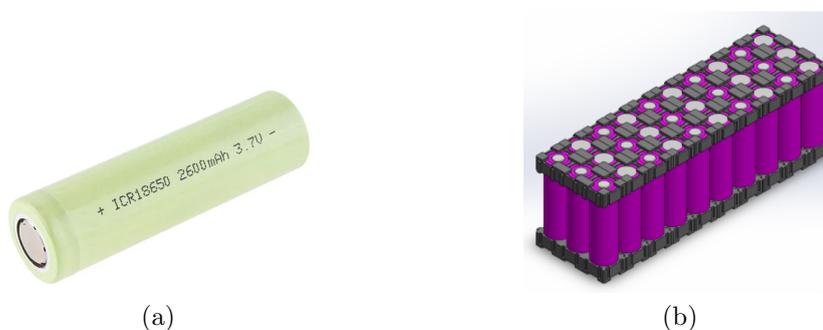


Fig. 4.5: a) batería Li-ion 18650 [25]. b) banco de baterías Li-ion.

En la tabla 4.5 se presentan ventajas y desventajas entre baterías Lipo y Li-ion. Con esta información se puede concluir que el uso de baterías Li-ion debe usarse en el exterior, debido a las dimensión del banco de baterías. Además, se necesitarán mínimo 6 de estas

baterías para equiparar en capacidad a una batería Lipo con capacidad de 4500mAh como se presenta en la tabla 4.6.

Tabla 4.5: comparación de baterías.

Batería	Ventajas	Desventajas
Lipo	<ul style="list-style-type: none"> - Menor peso. - Mantiene mejor su carga nominal. - Dimensiones reducido. 	<ul style="list-style-type: none"> - Delicadas (el deterioro es irreversible). - Costosas a diferencia de las tradicionales. - Tiempo de vida más corto.
Li-ion	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada densidad de energía. - Carecen de efecto memoria. - Baja tasa de auto-descarga. 	<ul style="list-style-type: none"> - Inestables. Necesitan un controlador de tensión y temperatura en las celdas (controlador BMS). - Peor capacidad de trabajo en frío.

Tabla 4.6: comparación precios y configuración de batería.

Fuente	Configuración	Capacidad	Precio
Li-ion x6	2 grupos en paralelo de 3 Li-ion por grupo en serie	5200mAh	\$41.340
Reedy Wolfpack Gen2	Batería por sí sola	4500mAh	\$64.990

Si bien el ejemplo que se plasma en la tabla 4.6 evidencia que el banco de baterías Li-ion es más económico, aún faltaría añadir el precio de los materiales para formar ese banco, además del dispositivo para recarga de este. También, se espera que en trabajos futuros el robot submarino pueda actuar con independencia, convertirse en un AUV (Autonomous Underwater Vehicle) por completo, es por eso que se decide optar por el uso de una batería Lipo, específicamente la presentada en la figura 4.6. Esta presenta las dimensiones adecuadas para ser implementada en el interior del vehículo.



Fig. 4.6: batería Lipo Reedy Wolfpack Gen2 3S. Fuente: [26]

Se procede a realizar un calculo del tiempo de navegación, con los datos promedio en que funcionarían los motores. Para ello, se considera una corriente promedio e 5(A) y 11.1(V).

Consumo de un motor en promedio: $11.1(V) * 5(A) = 55.5(W)$

$$\text{Consumo total: } 55.5(W) * 3 = 166.5(W)$$

$$\text{T tiempo estimado de navegación: } T = \frac{E}{P} = \frac{4.5(Ah) * 11.1(V)}{166.5(W)} 0.3 = (h) = 18(min)$$

El tiempo de navegación es de 18 minutos en promedio. Este dato, podría ser mayor, ya que el vehículo no pretende operar en altas velocidades.

Una vez seleccionada la batería, se procederá a indicar como esta y otros dispositivos se interconectan en el vehículo

4.6. Conexión e integración

Los dispositivos que se han mencionado a lo largo de los capítulos y este, deberán integrarse a la estructura y conectarse entre sí. En esta sección se presenta el conexionado de estos.

En la figura 4.7 se presenta un esquema general del como interactúan estos elementos, donde a grandes rasgos se forman en 2 sistemas; de control y comunicación. Cabe señalar que en este sistema no se considera un sensor de posicionamiento como los revisados en el estado del arte, sino que solo el sensor de inclinación del vehículo (IMU). Este último se comunicará continuamente con el microcontrolador (Arduino) y este controlará las señales de velocidad para cada motor, según la información de inclinación (roll, pitch, yaw).

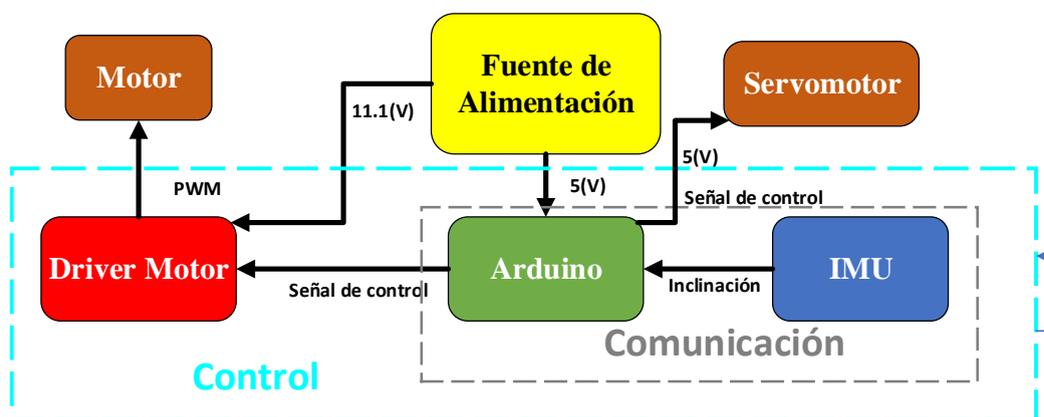


Fig. 4.7: bloques de conexión.

La idea de conexión entre motor, driver y fuente de alimentación se presenta en el esquema de la figura 4.8. En esta, se utiliza un ESC para plasmar la idea. No obstante, se utilizará el driver de la figura 4.2a. Aún así, el ESC es un ejemplo y no cambiará su resultado. También se visualiza las señales de salida y entrada del esquema; de color púrpura la señal de control proveniente del microcontrolador (entrada) y la señal BEC (Battery Elimination Circuit) con la que se alimentará la placa Arduino. Esta señal BEC también es propia del driver a utilizar (figura 4.2a), teniendo una salida de 5(V).

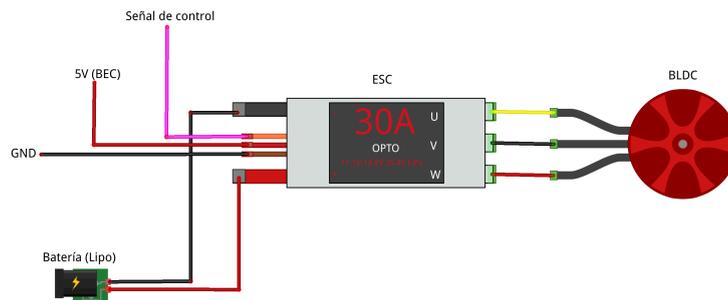


Fig. 4.8: esquema de conexión Motor-Driver-Arduino.

Luego, en la figura 4.9 se presenta el esquema del conexionado del sistema de comunicación. En este, el sensor IMU (6050), se comunica con el dispositivo Arduino mediante un protocolo. Este protocolo puede ser UART, SPI, I2C. En este caso el conexionado se hizo pensando en un protocolo I2C a modo de ejemplo. Sin embargo, profundizar en la comunicación esta fuera del alcance de este proyecto, dejándolo para trabajos futuros. Por otro lado, se visualizan las salidas de señales de control por parte de Arduino, estas para cada driver de motor y servomotor, en donde los primeros permiten el control de cada motor respectivamente.

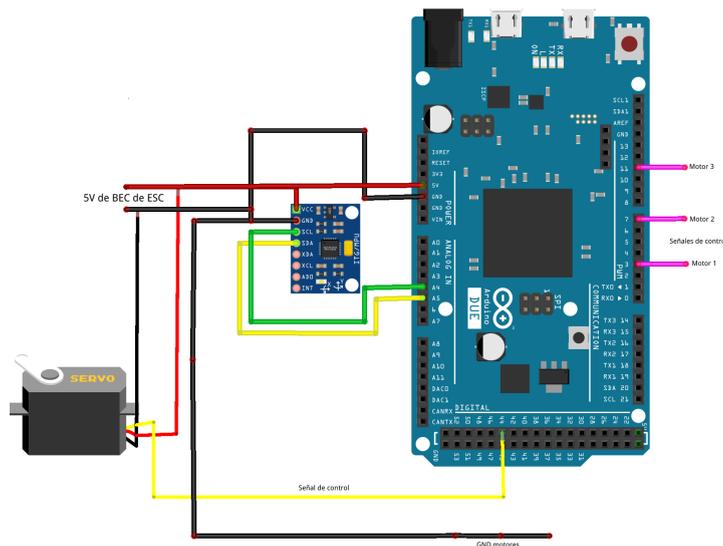


Fig. 4.9: esquema de conexión Arduino-IMU, servomotor.

Las conexiones específicas de todo el sistema, pueden ser revisadas en el Anexo C.

Finalmente, en las siguientes figuras se presenta la integración y distribución de los dispositivos electrónicos, en conjunto de la estructura y componentes mencionados en el Capítulo 2 y 3. En la figura 4.10 se presenta la distribución de los componentes electrónicos al interior del prototipo y una identificación de estos que se especifica en la tabla 4.7.

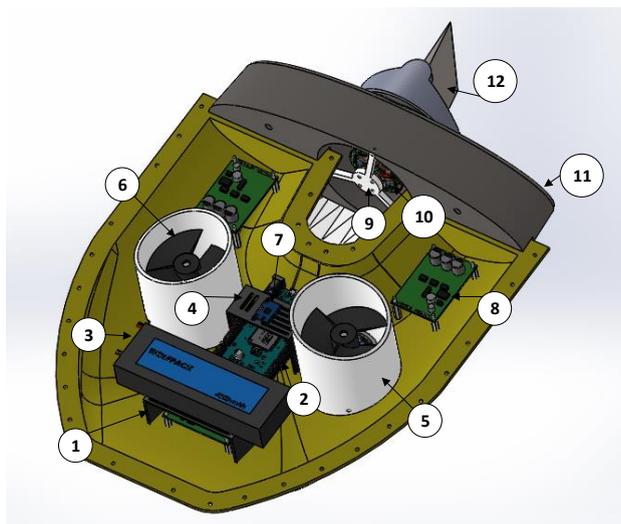


Fig. 4.10: integración de componentes electrónicos y otros elementos.

Tabla 4.7: elementos de electrónica y otros elementos.

N° elemento	Nombre
1	Soporte de batería
2	Arduino Mega
3	Batería
4	Soporte IMU
5	Tubo o encamisado
6	Hélice
7	IMU
8	Controlador motor brushless
9	Soporte motor brushless - cola
10	Motor cola
11	Cola
12	Sistema timón

En las figuras 4.11 y 4.12 se presentan vistas explosionadas de los conjuntos motores-hélices y cola-motor respectivamente.

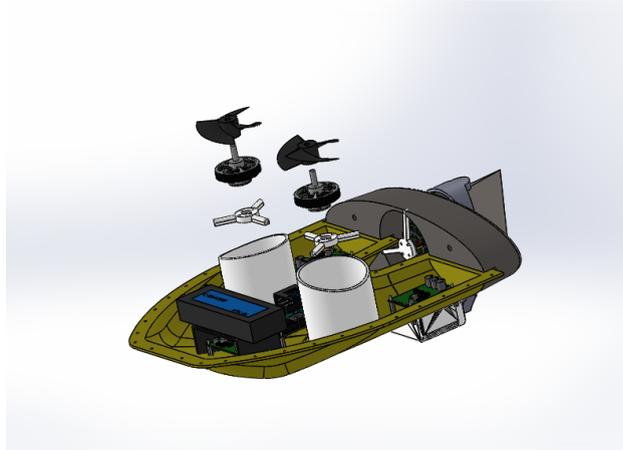


Fig. 4.11: vista explosionada - conjunto de motores y hélices.

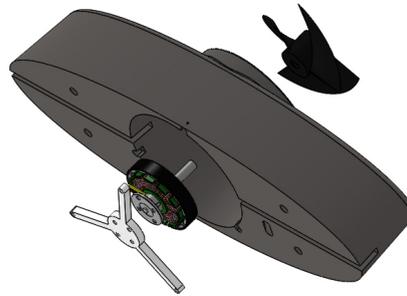


Fig. 4.12: vista explosionada - elementos de cola.

En el Anexo A.1 se presenta un plano de una vista explosionada del ensamble.

En el siguiente capítulo se presenta un marco teórico donde se definen las ecuaciones que representan a este tipo de sistemas, el cual posteriormente es utilizado en el control de posición.

5. Modelamiento de un vehículo submarino

5.1. Introducción

Para controlar la posición de un robot submarino, es importante y necesario conocer el modelo matemático que describe a este sistema. Esta sección abarca conceptos y ecuaciones que posteriormente se utilizan en la implementación de un controlador. A continuación, se aborda la teoría, modelado cinemático y dinámico de robots submarinos. El modelado cinemático consiste en ecuaciones que relacionan los diferentes tipos de coordenadas utilizadas para expresar la velocidad del vehículo. Por otro lado, en el modelo dinámico se describen las fuerzas que actúan sobre el robot cuando este navega [32], además de las ecuaciones que representan el movimiento para cuerpos sumergidos en agua. Sin embargo, se presentan aquellas ecuaciones más importantes no profundizando en algunos parámetros del modelo, por lo que se espera que el controlador compense estos errores en el modelo.

5.2. Marco teórico

5.2.1. Marcos de referencia

Para analizar el movimiento de un robot submarino en 6 grados GDL, es conveniente definir dos marcos de referencia como se muestra en la figura 5.1. En esta se presenta el prototipo desarrollado, junto con un marco de referencia local y un marco de referencia inercial.

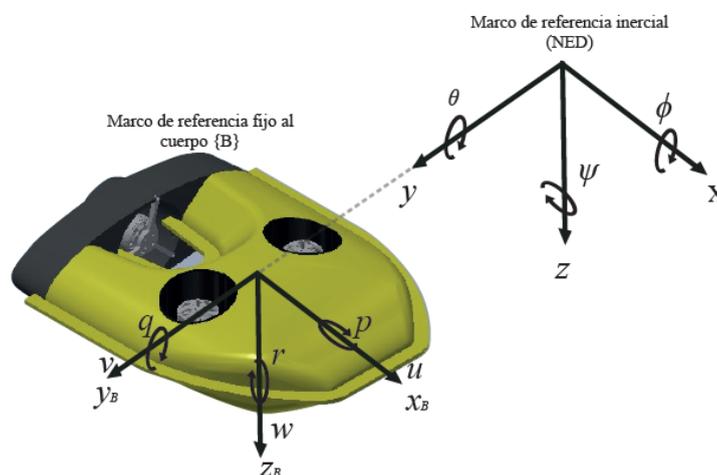


Fig. 5.1: marcos de referencia para describir el movimiento del vehículo.

- *Marco de referencia inercial (NED)*: Está ubicado sobre la superficie de la tierra y su nombre indica las siglas en inglés de norte-este-abajo (North-East-Down) [83]. En este marco el eje x apunta hacia el norte, el eje y apunta hacia el este, y el eje z apunta hacia abajo y es normal a la superficie de la Tierra, como se muestra en la figura 5.1.
- *Marco de referencia del cuerpo (B)*: Este marco de referencia está fijo al cuerpo del robot, como se muestra en la figura 5.1. El origen de este marco de referencia normalmente se hace coincidir con el centro de gravedad del cuerpo, cuando éste se encuentra

en el plano principal de simetría [83]. Los ejes de este marco se eligen de tal forma que coincidan con los ejes principales del marco inercial, siendo X_B el eje longitudinal (que va de atrás hacia adelante), Y_B el eje transversal (que va de un lado a otro), y Z_B que va dirigido hacia abajo.

De este modo la posición y la orientación del vehículo se expresa con respecto al marco de referencia inercial, mientras que la velocidad lineal y angular se expresa con respecto al marco de referencia local.

En el presente documento se utilizará la notación de la SNAME [29] para expresar la posición y la velocidad del vehículo la cual se presenta en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: notación de movimiento de vehículos marinos. Fuente: [29].

Movimiento	Nombre	Posición	Velocidad
Traslación en x	Surge	x	u
Traslación en y	Sway	y	v
Traslación en z	Heave	z	w
Rotación en x	Roll	ϕ	p
Rotación en y	Pitch	θ	q
Rotación en z	Yaw	ψ	r

5.2.2. Flotación

Los vehículos marinos al estar parcial o totalmente sumergidos en cierta masa de agua, producen una fuerza de empuje o fuerza ascendente, la cual debe ser equilibrada con el peso del mismo vehículo para así mantener su posición en el eje vertical. Esto con el objetivo de mantener estabilidad y no producir momentos de fuerza no deseados. Para esto, el centro de gravedad debe situarse en la vertical con el centro de carena (centro geométrico de la parte sumergida del vehículo) y por debajo de este [84] como se visualiza en la figura 5.2. Esto explica el hecho de que los vehículos marino se diseñen con una mayor concentración de masa en la parte inferior de vehículo, para tener mayor equilibrio.

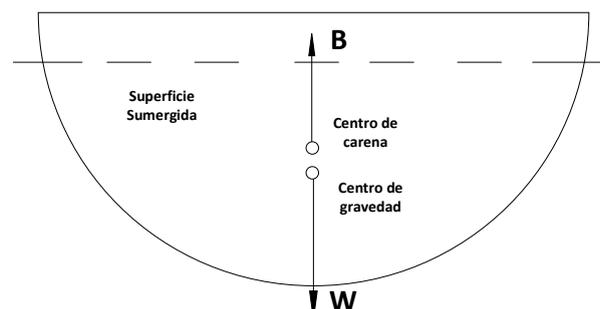


Fig. 5.2: fuerzas de flotación.

Como se puede ver en la figura 5.2 se distinguen 2 fuerzas, la de flotación B y la fuerza del peso del vehículo W alineadas respecto la vertical, evitando que se produzcan momentos no deseados. Además, al estar el centro de gravedad por debajo del centro de carena, pequeñas variaciones en la inclinación del vehículo producirán un momento corrector que tenderá llevar al vehículo a su posición inicial [84]. Por lo tanto, la magnitud de ese momento corrector solo dependerá de la suma de fuerzas ($B+W$) y la distancia (d) entre ellas en el plano horizontal. Ec. (5.1) define este momento.

$$RM = \frac{1}{2} \cdot d \cdot (B + W) \quad (5.1)$$

Por el contrario, si el centro de gravedad se ubica sobre el centro de carena, entonces el vehículo se encontraría en un equilibrio inestable, una pequeña perturbación provocaría un momento en la dirección contraria a la de equilibrio. Este fenómeno ocurre reiteradamente hasta provocar el vuelco del vehículo, hasta alcanzar esta nueva posición de equilibrio donde el centro de gravedad se ha posicionado por debajo del centro de carena [84].

Aplicando el principio de Arquímedes se calcula la fuerza de flotación. En donde la fuerza de empuje es igual al producto del volumen desplazado por la densidad del fluido (ver (5.2)).

$$B = -\rho_{agua} \cdot g \cdot V_{sumergido} \quad (5.2)$$

En este trabajo no se utiliza un submarino convencional que varíe su masa (control de lastre), sino que un prototipo que utiliza propulsores para maniobrar en el eje z . Por lo tanto, se buscará obtener una flotación neutra. Sin embargo, se considerará la opción de que esta fuerza sea ligeramente positiva ($B > W$), para que en caso de fallo el vehículo flote hacia la superficie [85].

5.3. Modelado del sistema

5.3.1. Modelado cinemático de robots submarinos

El modelo cinemático consiste en las ecuaciones que relacionan los dos marcos de referencia del sistema, en nuestro caso de estudio, el marco de referencia del submarino (local) con el marco de referencia inercial. En [84], se presentan las ecuaciones cinemáticas para un vehículo marino de 6 GDL, las cuales pueden ser expresadas mediante ángulos de Euler de la siguiente manera:

$$\dot{\eta} = J(\eta)\nu \quad (5.3)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{P}^n \\ \dot{\Theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_b^n & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & T_\Theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^b \\ w^b \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Donde los vectores $\eta = [P^n \ \Theta]^T$ y $\nu = [v^b \ w^b]^T$ son los vectores de posición y velocidad del robot submarino respectivamente; mientras que $P^n = [x \ y \ z]^T$ y $\Theta = [\phi \ \theta \ \psi]^T$ es la posición y orientación inercial del vehículo para cada uno, $v^b = [u \ v \ w]^T$ y $w^b = [p \ q \ r]^T$ es

la velocidad lineal y angular correspondientemente, respecto al eje de coordenadas local. Las matrices de R_b^n y T_Θ están dadas por (5.5) y (5.6).

$$R_b^n = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\phi s\theta s\psi & -c\psi s\phi + s\theta s\psi c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$T_\Theta = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix}, \quad (5.6)$$

donde $s(\cdot)=\text{sen}(\cdot)$, $c(\cdot)=\text{cos}(\cdot)$, $t(\cdot)=\text{tan}(\cdot)$.

Con (5.5) será posible transformar un vector de un marco de referencia a otro. Así, un vector de coordenadas locales que se desee expresar en el marco de referencia inercial, ha de multiplicarse por la matriz de rotación presentada. Si se desea realizar el proceso inverso, bastará con calcular la inversa de la matriz de rotación, la cual coincide con su transpuesta. Por otro lado, la matriz presentada en la (5.6) es la matriz de rotación correspondiente para las velocidades angulares [84].

Es importante señalar que la (5.6) no está definida para el ángulo $\theta = \pm 90$, sin embargo, los vehículos ROV (*Remoted Operated Vehicles*) se diseñan para que no operen en esta orientación.

5.3.2. Modelado dinámico de robots submarinos

El modelo dinámico de un robot submarino describe la relación existente entre los movimientos del robot y las fuerzas que se ejercen sobre el mismo. Las ecuaciones de movimiento dinámicas de 6 GDL para un vehículo marino se expresan como

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau, \quad (5.7)$$

donde:

- M : Es la matriz de masas e inercia.
- $C(v)$: Es la matriz de Coriolis y términos centrípetos.
- $D(v)$: Es la matriz de fuerzas viscosas.
- $g(\eta)$: Es el vector de fuerzas de restitución.
- v : Es el vector de velocidad del robot submarino.
- τ : Es el vector de entradas de control, correspondientes a la fuerza de empuje de los propulsores.

En los siguientes apartados se presentan y desarrollan cada una de estas matrices y vectores. Considerando que el origen del marco de referencia del cuerpo coincide con el centro de gravedad del vehículo (CG), con la finalidad de reducir la complejidad del modelo.

5.3.3. Fuerzas inerciales

La matriz de masas M (ver (5.8)) esta formada por la matriz de la masa y la inercia del vehículo M_{RB} , así como también por la matriz de masa virtual M_A .

$$M = M_{RB} + M_A \quad (5.8)$$

La matriz M_{RB} tiene en cuenta los efectos inerciales que produce el cuerpo rígido, pero se debe tener en cuenta la masa del fluido que arrastra consigo al desplazarse, y que adquiere cierta inercia al moverse. Esto puede ser expresado como

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ mz_G & 0 & 0 & -mx_G & I_{yy} & I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix}. \quad (5.9)$$

En el caso del vehículo en el que se trabaja, se anulan los productos de inercias cruzados (I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}), pues el prototipo es simétrico. Además si se considera que el centro de gravedad en X, Y y Z son muy cercanos a 0, se puede trabajar con estos parámetros como si fuesen nulos. No obstante, si se obtienen dichos parámetros (de forma experimental) (x_G, y_G, z_G) pueden considerarse en la matriz, ya que no conlleva una mayor complejidad en cuanto a cálculo.

La matriz M_A se compone de coeficientes que dependen de la masa de fluido que arrastra el vehículo al desplazarse, la cual depende de su geometría, y que al estar este completamente sumergido pueden considerarse como constantes.

Al tener el vehículo tres planos de simetría se puede despreciar la contribución en el comportamiento del vehículo de los elementos fuera de la diagonal de la matriz por lo que se puede simplificar [58], resultando como

$$M_A = - \begin{bmatrix} X\dot{u} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y\dot{v} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z\dot{w} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K\dot{p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M\dot{q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N\dot{r} \end{bmatrix}. \quad (5.10)$$

La matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis puede adoptar diferentes formas. En este caso se adopta una que hace que esta matriz sea antisimétrica. Una matriz antisimétrica tiene la propiedad $C_A(v) = -C_A(v)^T$. Por lo tanto, la matriz de Coriolis esta dada por

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} O_{3 \times 3} & -S(A_{11} \cdot v_1 + A_{11} \cdot v_2) \\ -S(A_{11} \cdot v_1 + A_{11} \cdot v_2) & -S(A_{21} \cdot v_1 + A_{22} \cdot v_2) \end{bmatrix}, \quad (5.11)$$

siendo las matrices A submatrices 3x3 de la matriz de masas

$$M = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad (5.12)$$

donde los vectores v_1 y v_2 son vectores 3x1 de posición lineal y angular

$$v = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}. \quad (5.13)$$

De este modo, S es la trasformada de un vector lineal tal que

$$a = (a_1, a_2, a_3), \quad (5.14)$$

$$S(a) = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.15)$$

En este caso obtendremos una matriz dependiente de la velocidad en cada instante. A continuación, se resuelve la matriz de forma genérica, dado una matriz de masas y vector de velocidad.

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} & m_{15} & m_{16} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} & m_{25} & m_{26} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} & m_{35} & m_{36} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} & m_{45} & m_{46} \\ m_{51} & m_{52} & m_{53} & m_{54} & m_{55} & m_{56} \\ m_{61} & m_{62} & m_{63} & m_{64} & m_{65} & m_{66} \end{bmatrix}; \quad v = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix}. \quad (5.16)$$

Finalmente, la matriz de Coriolis queda representada por (5.17), en la que depende de los coeficientes a_i y b_i :

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ 0 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.17)$$

En consecuencia, se deben calcular estos coeficientes. En 5.18 se presentan las dependencias de cada coeficiente para ser obtenido. Como se puede ver, dependerá del vector de

velocidad del vehículo. Por lo que se deberá realimentar esta matriz en cada instante del movimiento de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= m_{11} \cdot u + m_{12} \cdot v + m_{13} \cdot w + m_{14} \cdot p + m_{15} \cdot q + m_{16} \cdot r \\
 a_2 &= m_{21} \cdot u + m_{22} \cdot v + m_{23} \cdot w + m_{24} \cdot p + m_{25} \cdot q + m_{26} \cdot r \\
 a_3 &= m_{31} \cdot u + m_{32} \cdot v + m_{33} \cdot w + m_{34} \cdot p + m_{35} \cdot q + m_{36} \cdot r \\
 b_1 &= m_{41} \cdot u + m_{42} \cdot v + m_{43} \cdot w + m_{44} \cdot p + m_{45} \cdot q + m_{46} \cdot r \\
 b_2 &= m_{51} \cdot u + m_{52} \cdot v + m_{53} \cdot w + m_{54} \cdot p + m_{55} \cdot q + m_{56} \cdot r \\
 b_3 &= m_{61} \cdot u + m_{62} \cdot v + m_{63} \cdot w + m_{64} \cdot p + m_{65} \cdot q + m_{66} \cdot r
 \end{aligned} \tag{5.18}$$

5.3.4. Fuerzas hidrodinámicas

En el trabajo de [58], se resume las fuerzas hidrodinámicas para un cuerpo completamente sumergido en el agua, como

$$D(v) = - \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix}, \tag{5.19}$$

donde $X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r$, son parámetros hidrodinámicos que representan la fricción que ejerce la viscosidad del fluido sobre el vehículo. Por otra parte, las fuerzas de arrastre pueden ser separados en dos términos; lineal y cuadrático $D(v) = D_q(v) + D_l(v)$, donde $D_q(v)$ y $D_l(v)$ son los terminos cuadráticos y lineal de arrastre respectivamente.

La fuerza de arrastre cuadrática axial de un vehículo se puede modelar con

$$X = -\left(\frac{1}{2}\rho C_d A_f\right)u|u| = X_{u|u}u|u|, \tag{5.20}$$

donde $X_{u|u} = \frac{\partial X}{\partial (u|u|)} = -\frac{1}{2}\rho C_d A_f$. La notación matricial de (5.20) que da la matriz de arrastre cuadrática, está dada por

$$D(v) = - \begin{bmatrix} X_{u|u}|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{v|v}|v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{w|w}|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{p|p}|p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{q|q}|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{r|r}|r| \end{bmatrix}. \tag{5.21}$$

Matemáticamente y con la ayuda de un simulador se suele ocupar (5.22) para obtener los coeficientes de arrastre.

$$\text{Fuerzadearrastre} = X_u u + X_{u|u}u|u|, \tag{5.22}$$

donde u es la velocidad de avance, X_u es la la fuerza de arrastre (lineal) en la dirección de avance con respecto a u , $X_{u|u}$ es la fuerza de arrastre (cuadrática) en la dirección de avance

con respecto a $u|u|$.

En este proyecto se considera el cálculo y estimación de estos coeficientes, por lo que mediante simulación en ANSYS se obtienen los coeficientes que se presentan en la tabla 5.2. El procedimiento y más detalle puede ser revisado en el Anexo D.

Tabla 5.2: coeficientes de arrastre obtenidos en ANSYS.

Método	Coeficientes de Arrastre							
	Surge		Sway		Heave		Yaw	
ANSYS FLUENT	X_u	X_{uu}	Y_v	Y_{vv}	Z_w	Z_{ww}	N_r	N_{rr}
	0,431	6,223	0,1932	8,7261	1,9168	19,2594	0,000816	0,1412

5.3.5. Fuerzas de restitución

Existen 2 fuerzas que intervienen en la flotación del vehículo, la fuerza de la gravedad (W), que actúa sobre el centro de gravedad, y la fuerza de la flotación (B) que actúa sobre el centro de carena. La magnitud de estas fuerzas es fácil de calcular, y su dirección y sentido en coordenadas locales dependerá de la posición angular del vehículo. La fuerza de flotación puede obtenerse de (5.1) y la fuerza de la gravedad como

$$W = mg, \quad (5.23)$$

la cual puede ser expresada en los vectores

$$f_W = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} \quad y \quad f_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix}. \quad (5.24)$$

Como consideramos el centro de carena como el origen de coordenadas de nuestro sistema local, la fuerza de flotación no produce momentos, pero si lo hará la fuerza gravitatoria, por lo tanto, teniendo en cuenta los puntos de aplicación de las fuerzas podemos calcular el vector de fuerzas y momentos de flotación en coordenadas globales.

Para calcular las fuerzas solo es necesario realizar la suma de la fuerza gravitatoria y la fuerza de flotación, de la siguiente manera:

$$g_1^W = f_W + f_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W + B \end{bmatrix}. \quad (5.25)$$

Luego se calculan los momentos como

$$g_2^W = r_G x f_W = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ x_G & y_G & z_G \\ 0 & 0 & W \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} -y_G \cdot W \\ x_G \cdot W \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5.26)$$

De esta forma, el vector de flotación, compuesto por los vectores g_1 y g_2 corresponde al siguiente:

$$g^W = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W + B \\ -y_g \cdot W \\ x_G \cdot W \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5.27)$$

Para obtener el vector en coordenadas locales, se realiza la transformación de las fuerzas de gravedad y flotación, multiplicandolas por la transpuesta de la matriz de rotación. Se presenta el desarrollo de esta transformación desde (5.28) - (5.30).

$$g_1^W = (f_W + f_B)^B = R^T \cdot (f_W + f_B)^W \begin{bmatrix} -(W + B)s\phi \\ (W + B)c\theta s\phi \\ (W + B)c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

$$g_2^B = (r_G x(f_W))^B = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ x_G & y_G & z_G \\ -W s\theta & W c\theta s\phi & W c\theta c\phi \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} y_G W c\theta c\phi - z_G W c\theta s\phi \\ -z_G W s\theta - x_G W c\theta c\phi \\ x_G W c\theta s\phi + y_G W s\theta \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

$$g^B = g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B)s\theta \\ -(W - B)c\theta s\phi \\ -(W - B)c\theta c\phi \\ -(y_G W - y_B)c\theta c\phi + (z_G W - z_B)c\theta s\phi \\ (z_G W - z_B)s\theta + (x_G W - x_B)c\theta c\phi \\ -(x_G W - x_B)c\theta s\phi + (y_G W - y_B)c\theta s\theta \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

Ec. (5.30) corresponde al vector que representa las fuerzas de restitución en un vehículo sumergido. Como se puede observar este vector depende de la posición angular del vehículo, por lo que se debe estar realimentando en cada instante con el vector posición del vehículo.

5.3.6. Fuerzas de propulsión

El vector τ se puede calcular a partir de la matriz de orientación y posición L y el vector de fuerzas de los propulsores U .

La matriz L está formada por seis filas, para introducir el vector unitario de orientación u y el vector de posición r de cada propulsor, y seis columnas, tantas como el número de propulsores. De forma general, una matriz L para un número N de propulsores tiene la siguiente forma de (5.31), donde u_i y v_i son vectores columna de dimensión 3.

$$L = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & \dots & u_N \\ r_1 & r_2 & \dots & r_N \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

A modo de ejemplo, tomaremos el caso en que la matriz L corresponde a la que se presenta en (5.32) donde $N = 3$ (número de propulsores) y

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & l_2 \\ -l_1 & l_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.32)$$

El valor de l_1 y l_2 corresponden a 75(mm) y 173(mm) respectivamente, en el caso de este trabajo. La matriz L se puede dividir en dos. Por un lado la matriz L_1 con los vectores de orientación y por otro la matriz L_2 con los vectores de posición;

$$L_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5.33)$$

$$L_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & l_2 \\ -l_1 & l_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.34)$$

El vector de fuerzas de propulsión es un vector columna de dimensión igual al número de propulsores. De forma general, un vector U con un número N de propulsores tiene la forma de (5.35). Donde T_i son vectores columna de dimensión 3.

$$U = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_N \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

Para calcular las fuerzas y momentos de propulsión necesitamos utilizar las matrices L_1 y L_2 ((5.33)-(5.34)). Las fuerzas se calculan fácilmente multiplicando el vector L_1 por el vector U .

$$\tau_1 = L_1 \cdot U = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_3 \\ 0 \\ T_1 + T_2 \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

Para calcular los momentos es necesario realizar el producto vectorial de cada vector posición por su vector unitario de orientación y por la fuerza de dicho propulsor, como

$$\tau_{2,i} = r_i x u_i \cdot T_i, \quad (5.37)$$

donde la sumatoria de estos vectores produce el vector

$$\tau_2 = \sum_{i=1}^3 \tau_{2,i} = \begin{bmatrix} l_1(T_1 - T_2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5.38)$$

Finalmente, uniendo los vectores τ_1 y τ_2 obtenemos el vector de fuerzas de propulsión:

$$\tau = \begin{bmatrix} T_3 \\ 0 \\ T_1 + T_2 \\ l_1(T_1 - T_2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5.39)$$

En el caso de este trabajo el vector de propulsión queda de la siguiente manera, siendo no lineal.

$$\tau = \begin{bmatrix} T_3 \\ T_3 \cdot \text{sen}(T_4) \\ T_1 + T_2 \\ l \cdot T_1 - l \cdot T_2 \\ b \cdot T_1 + b \cdot T_2 + a \cdot T_3 \\ d \cdot T_4 \end{bmatrix}, \quad (5.40)$$

donde l, b, a, d corresponden a la distancia que genera el torque o momento en cada actuador. T_1 y T_2 los motores orientados verticalmente, T_3 el motor de propulsión de avance horizontal, y por último T_4 el timón que produce el viraje y orientación en yaw.

En el siguiente capítulo se abarca el control de posición del vehículo submarino. Este solo se plantea teóricamente y es validado en el software Simulink-Matlab.

5.4. Discusión y Conclusiones

Las ecuaciones presentadas en este capítulo, describen el comportamiento del vehículo submarino ante fuerzas tanto en régimen transiente estacionario. Estas matrices serán utilizadas para la simulación del control de posicionamiento del robot dada una posición $[x, y, z, \phi, \theta, \psi]$ deseada.

Es crucial utilizar la matriz de rotación para transformar las variables de posición del marco local al inercial, pues la posición del robot obtiene de este último.

Los parámetros de la matriz de masas y fuerzas inerciales deben ser obtenidos de manera experimental, calculando las áreas para cada plano del robot. Por otro lado, los momentos de inercia se pueden obtener del software Inventor, en el cual se diseña el vehículo en el módulo de Taller de Integración 3, al igual que se pueden obtener los parámetros de centro de gravedad. Este último punto es importante debido a que si se logra que las coordenadas del centro de gravedad sean igual a 0 o muy cercano a este valor, puedan anularse elementos de la matriz M , haciendo más fácil su cálculo.

En cuanto a la matriz de Coriolis y fuerzas centrípetas, se debe considerar la realimentación de las velocidades del robot en cada instante para obtener los coeficientes a_i y b_i de $C_A(v)$.

En la matriz de resistencia hidrodinámica, se debe realizar un trabajo de cálculo de fuerzas de arrastres para cada cara del robot, y luego estos valores ser añadidos en la diagonal y/o elementos cruzados. Este trabajo se analiza con detalle en [84].

Para el vector de flotación o restitución se debe tener la consideración de realimentar en cada instante con los valores de la posición inercial del robot. Un detalle importante en este vector es el hecho de que el cuerpo tenga una flotación neutra, ya que de no ser así se puede provocar fuerzas ascendentes o descendentes indeseadas. En el trabajo de [85] esta relación entre fuerza de gravedad y empuje se sostuvo como ligeramente positiva para $B > W$, con la justificación de que si el vehículo fallase este pueda ser retirado manualmente con mayor facilidad. Por otro lado el vehículo podría fallar y sumergirse, provocando dificultades.

Finalmente, respecto al vector de fuerzas de propulsión, se obtiene que para la dirección y se depende de 2 entradas, por lo que se presenta no linealidad en el sistema de propulsión en esa dirección. No obstante, en el capítulo de control se revisa una estrategia de control para simplificar el problema. Este sistema es no-holonómico [32], por lo que para alcanzar algunas posiciones deseadas deberá realizar trayectorias complejas.

6. Control de posición

Este capítulo contempla la estrategia de control en el posicionamiento que se implementa en el vehículo submarino. Las variables a controlar son las coordenadas X, Y y Z en el marco inercial respecto al marco de referencia local del prototipo. La sección comienza con detallar las variables que actúan en el dispositivo y como estas lo afectan. Luego se identifica el problema de control de posicionamiento para avanzar hacia una propuesta de estrategia de control, terminando con la presentación de resultados a través de simulaciones que se ejecutan en el software Matlab-Simulink. Finalmente se discuten los resultados obtenidos.

6.1. Variables del vehículo

Se comienza definiendo los sistemas de referencias para el vehículo submarino, para luego identificar fuerzas, momentos, y variables de interés de estudio del sistema.

En la figura 6.1 se presentan los sistemas de referencia tal como se menciona en el Capítulo 5.

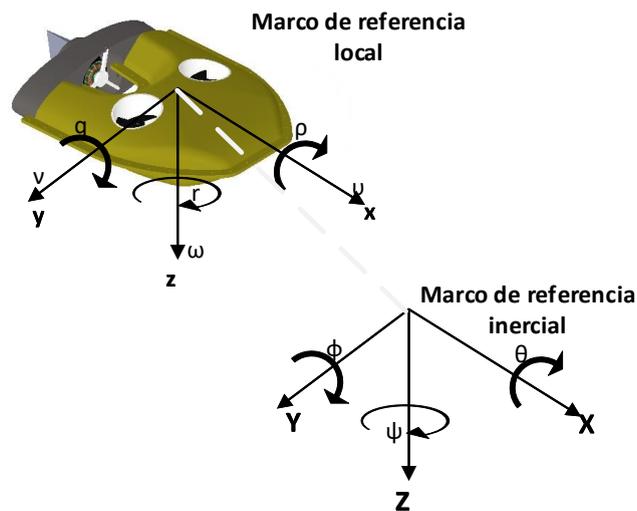


Fig. 6.1: marcos de referencia.

El dispositivo cuenta con 4 actuadores; 3 motores brushless (propulsores) y 1 servomotor (timón). Estos actuadores provocan fuerzas y momentos, los cuales se presentan en las siguientes figuras, donde U_1 , U_2 , U_3 y U_4 representa a un actuador respectivamente.

La figura 6.2 es una representación de la vista superior del vehículo, en la cual se muestra un ejemplo de marco inercial y local, además en la parte derecha de la imagen se identifican variables como ψ (yaw), δ (ángulo de timón), v (velocidad lineal en x), ν (velocidad lineal en y), En la figura 6.3 además de actuadores se visualiza ω (velocidad lineal en z).

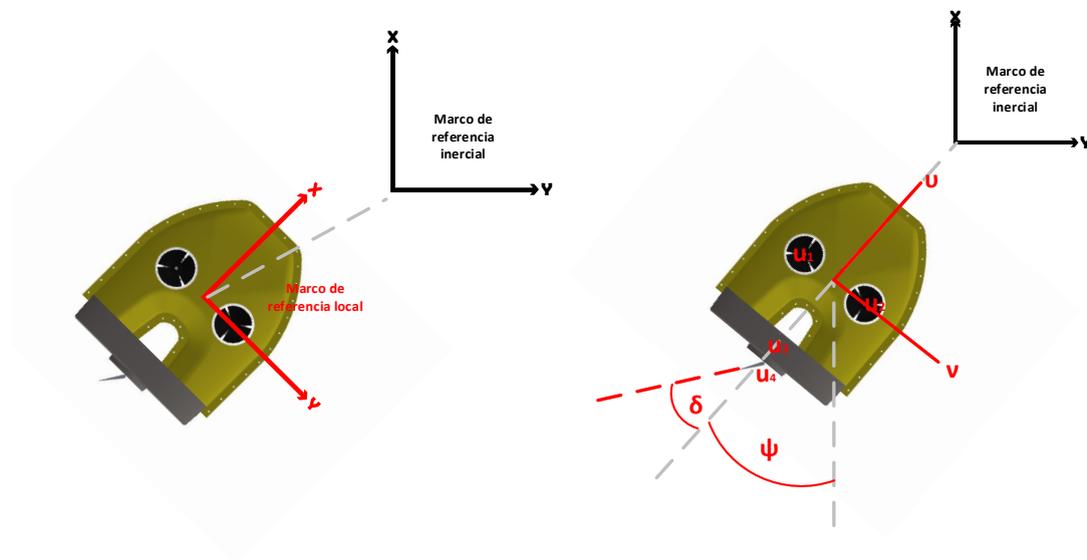


Fig. 6.2: vista superior, identificación actuadores, yaw, ángulo timón.

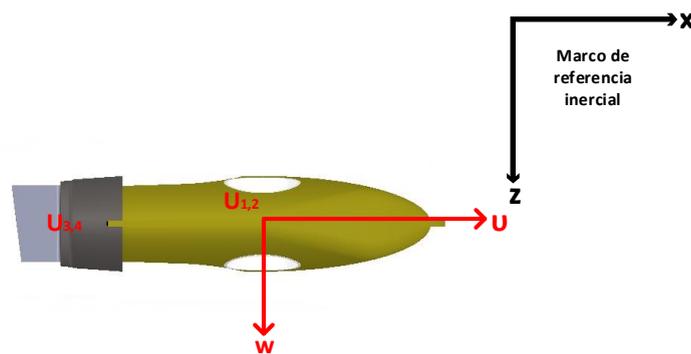


Fig. 6.3: vista lateral, identificación de actuadores y velocidades lineales.

Como se ha mencionado, los actuadores provocan fuerzas y momentos. En la figura 6.4 se puede ver estas fuerzas interactuando en el móvil. Donde F_1 , F_2 , F_3 y F_4 corresponden a las fuerzas ejercidas por cada actuador U_i (donde $i = 1, 2, 3, 4$) respectivamente. En cuanto a los momentos (M_1 , M_2 , M_3 y M_4) ocurre algo similar, salvo por M_3 que se conforma por la interacción de las fuerzas F_1 , F_2 y F_3 .

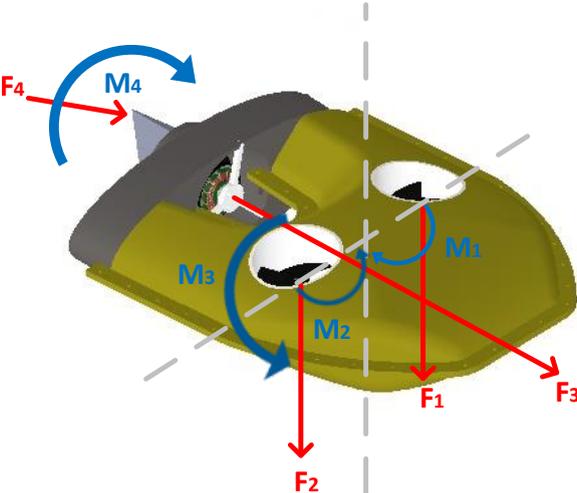


Fig. 6.4: vista isométrica, fuerzas y momentos.

La figura 6.5 muestra desde la vista frontal las fuerzas y momentos que se generan.

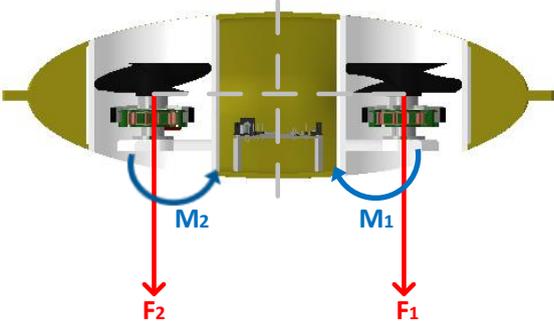


Fig. 6.5: vista frontal, fuerzas y momentos.

La tabla 6.1 muestra un resumen de las variables mencionadas anteriormente.

Tabla 6.1: resumen de parámetros y variables.

Parámetro/Variable	Descripción
U_1	Corresponde al actuador 1 posicionado verticalmente. Cumple la función de propulsor (motor brushless)
U_2	Corresponde al actuador 2 posicionado verticalmente. Cumple la función de propulsor (motor brushless)
U_3	Corresponde al actuador 3 posicionado horizontalmente o axial. Cumple la función de propulsor (motor brushless en la cola)
U_4	Corresponde al actuador 4 posicionado atrás del actuador 4 (cola). Cumple la función e timón (servomotor)
X	Eje X en el marco inercial
Y	Eje Y en el marco inercial
Z	Eje Z en el marco inercial
x	Eje x en el marco local
y	Eje y en el marco local
z	Eje z en el marco local
v	Velocidad lineal en x
ν	Velocidad lineal en y
ϖ	Velocidad lineal en z
p	Velocidad angular en el eje x
q	Velocidad angular en el eje y
r	Velocidad angular en el eje z
θ	Posición angular en el eje x (roll)
ϕ	Posición angular en el eje y (pitch)
ψ	Posición angular en el eje z (yaw)
M_1	Momento provocado por la fuerza F_1 y la distancia de esta al origen
M_2	Momento provocado por la fuerza F_2 y la distancia de esta al origen
M_3	Momento provocado por la fuerza F_3 y la distancia de esta al origen
M_4	Momento provocado por la fuerza F_4 y la distancia de esta al origen
F_1	Fuerza provocada por el actuador 1 (U_1)
F_2	Fuerza provocada por el actuador 2 (U_2)
F_3	Fuerza provocada por el actuador 3 (U_3)
F_4	Fuerza provocada por el actuador 4 (U_4)
δ	Ángulo del timón. Posición inicial de 0° paralelo al eje x local.

Mencionadas y presentadas las variables que son provocadas por fuerzas del vehículo, en la tabla 6.2 se presentan parámetros y coeficientes intrínsecos del vehículo, donde parámetros como centros de gravedad se consideran como 0 para simplificar el sistema. Además

se entregan los valores obtenidos del peso y fuerza de flotación, los cuales se considerarán como de igual valor en el Capítulo 6 para simplificar aún mas el sistema. Los valores de estos parámetros son obtenidos mediante SolidWorks y pueden ser revisados en el Anexo E.

Tabla 6.2: parámetros y coeficientes del vehículo.

Coefficiente	Descripción	Valor
m	masa	3.52 (kg)
W	Peso vehículo	34.5 (N)
B	Empuje del fluido al vehículo	22.86 (N)
X_g	centro de gravedad en X	0 (m)
Y_g	centro de gravedad en Y	0 (m)
Z_g	centro de gravedad en Z	0 (m)
X_b	centro de flotabilidad en X	0 (m)
Y_b	centro de flotabilidad en Y	0 (m)
Z_b	centro de flotabilidad en Z	0 (m)
I_{xx}	Momento de inercia en X	0.03 kg · m ²
I_{yy}	Momento de inercia en Y	0.06 kg · m ²
I_{zz}	Momento de inercia en Z	0.08 kg · m ²

A continuación, se procede a identificar los problemas de control que pueden existir.

6.2. Identificación del problema de control

De las ecuaciones que se presentan en el Capítulo 5 se extrae información para determinar que el sistema este acoplado. Esto se debe a como están distribuidos espacialmente los actuadores y la cantidad de estos, convirtiéndolo en un sistema sub-actuado y no-holonómico.

Las siguientes ecuaciones representan las fuerzas y momentos del sistema, en el cual se puede dar cuenta del acople y la no linealidad del sistema que existe en pitch e Y respectivamente.

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= U_3 \\
 \dot{y} &= U_3 \cdot \text{sen}(U_4) \\
 \dot{z} &= U_1 + U_2 \\
 \dot{\theta} &= U_1 \cdot l - U_2 \cdot l \\
 \dot{\phi} &= U_1 \cdot b + U_2 \cdot b + U_3 \cdot a \\
 \dot{\psi} &= U_4 \cdot d
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

Donde l , b , d y a corresponden a distancias desde el centro de gravedad hasta donde se aplica la fuerza de cada actuador.

En las ecuaciones anteriores se puede notar como algunos movimientos dependen de más de 1 entrada.

Basándose en lo anterior señalado, se concluye que el sistema es complejo y este puede presentar dificultades al momento de simular el control de posición, por lo que se debe simplificar el modelo desacoplándolo y buscando una estrategia simple.

En el siguiente apartado se propone una estrategia de control para solucionar el acople del sistema.

6.3. Estrategia de control

Los vehículos submarinos tienen como estrategia de control base, el esquema que se presentan en la figura 6.6.

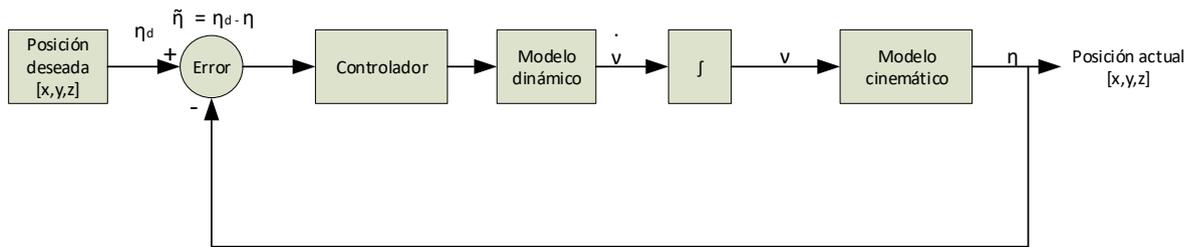


Fig. 6.6: esquema general de control.

Dependiendo de la cantidad de información que se tenga del modelo, será más o menos complejo el tipo de control a implementar. En este caso a estrategia de control que se propone es un control desacoplado, donde el sistema se separa en dos partes; en el plano X-Y como si fuera un vehículo terrestre, y en el plano Y-Z para controlar los movimientos de emersión y sumersión. De esta manera los motores U_1 y U_2 solo controlarán el movimiento en Z , y U_4 sólo estará encargado de ψ a la vez que U_3 lo impulsa. Se debe recalcar que en esta memoria no tiene por alcance el control de ϕ , por lo que el sistema se vuelve menos complejo.

Basándose en el control cinemático de vehículos terrestres [86], el modelo a seguir es el que se presenta en la figura 6.7, en donde dado un punto referenciado (x, y) en el marco inercial (B), es objetivo del marco local (A) para posicionarse.

Las ecuaciones a implementar para un control por referencia en el plano X-Y son las siguientes:

$$e_\psi = \psi_{ref} - \psi \quad (6.2)$$

$$\psi_r = \text{atan}\left(\frac{y_{error}}{x_{error}}\right) \quad (6.3)$$

$$w = K_1 \cdot \text{atan}(\tan(e_\psi)) \quad (6.4)$$

$$V = K_2 \cdot \sqrt{(x_{error})^2 + (y_{error})^2} \cdot \text{sign} \cdot (\cos(e_\psi)) \quad (6.5)$$

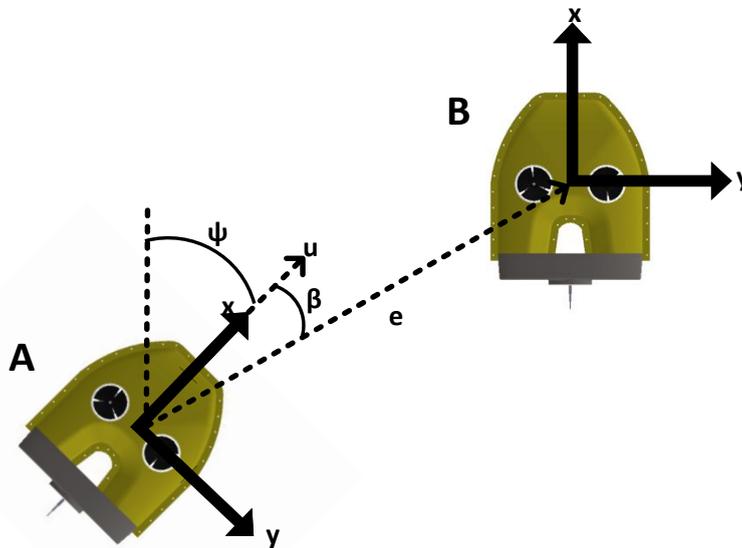


Fig. 6.7: visualización de plano X-Y y parámetros.

En este caso el robot requiere alcanzar una referencia (x,y) final en donde la orientación de este es arbitraria. El robot continuamente está controlando su dirección para alcanzar el objetivo. Esta dirección se denota como ψ_r , la cual se obtiene usando una relación geométrica que se presenta en figura 6.7.

El control se basa en utilizar la distancia o error entre estos puntos para crear un vector de velocidad. En la Figura 6.7 este vector está representado como e , y junto al vector de velocidad actual y su diferencia se encuentra la velocidad lineal necesaria donde esta es proporcionada a través del propulsor U_3 . Por otro lado, para poder corregir el error en Yaw y poder virar en dirección al punto deseado, se utiliza el ángulo β como referencia de error y se corrige con el ángulo del timón.

6.3.1. Consideraciones y suposiciones para simplificar el sistema

- Baja velocidad de avance (1 m/s máximo), por lo que las fuerzas de sustentación pueden ser despreciadas [87].
- Simetría en los 3 planos. El robot puede ser considerado simétrico en los 3 planos $(x-z, y-z, x-y)$. Además de operar a bajas velocidades.
- El centro de gravedad y el centro de flotación están correctamente alineados. A esto se le llama momento de alineación y asegura estabilidad horizontal.
- Movimiento de Pitch no se consideran en el control.
- El sistema de referencia local está posicionado en el centro de gravedad
- Modelo considerado sin perturbaciones.

- Los grados de libertad del vehículo se pueden desacoplar. El desacople supone que un movimiento a lo largo de un grado de libertad no afecta otro grado de libertad.

A continuación, se explica el esquema de control más detallado, mostrando la estrategia propuesta en bloques.

6.3.2. Esquema de Control

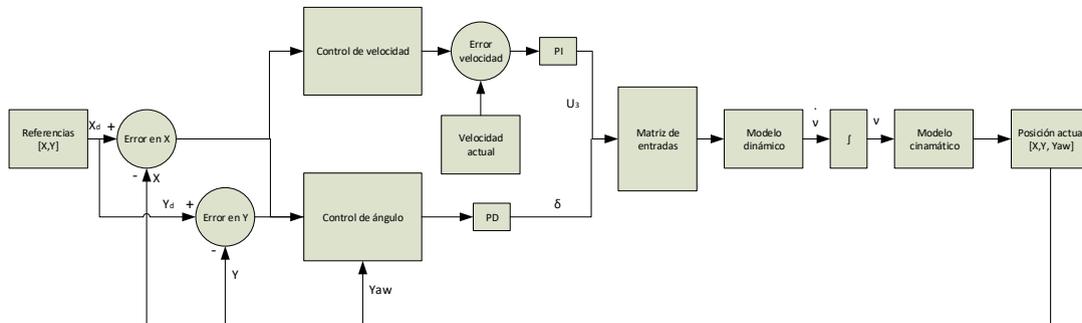


Fig. 6.8: esquema de control para el sistema desacoplado de X-Y-Yaw.

La figura 6.8 representa el esquema de control implementado en el plano X-Y, en donde se controla la posición (x,y) del robot. En esta, dada una referencia de coordenadas se calcula el error entre la posición deseada y la posición actual, para luego realizar un cálculo de velocidad requerida y del ángulo de dirección para alcanzar el objetivo final. Estas son las entradas de control que se utilizan en la matriz de entrada para luego calcular la aceleración del sistema dado un modelo dinámico simplificado. Luego, se obtiene la velocidad mediante integración y finalmente se aplica la transformada de Euler para pasar de un marco de referencia local a inercial, obteniendo la posición actual para así retroalimentar el sistema.

En paralelo (ver figura 6.9), se encuentra funcionando el control de sumersión y emersión (movimiento en Z) al cual se le da una referencia de Z y roll (este último se considera siempre con referencia en 0°). El error entre lo deseado y valor actual se multiplica por una ganancia K_p , para luego ingresar a una matriz de entrada del sistema en el cual se pondera un valor para cada motor según el error actual. Lo siguiente, se aplica al igual que en el esquema de control anterior, pasando por el modelo dinámico y finalmente obteniendo la posición en Z actual. Este método de control de ponderación es usado comúnmente en los sistemas de drones de vuelo.

A continuación se implementan los esquemas presentados en el software Simulink.

6.3.3. Simulaciones

Para simular, se utiliza tanto el software Matlab como su complemento Simulink. Además en el Anexo F se presenta tanto el esquema de control realizado en Simulink como el código de trayectoria implementado en Matlab.

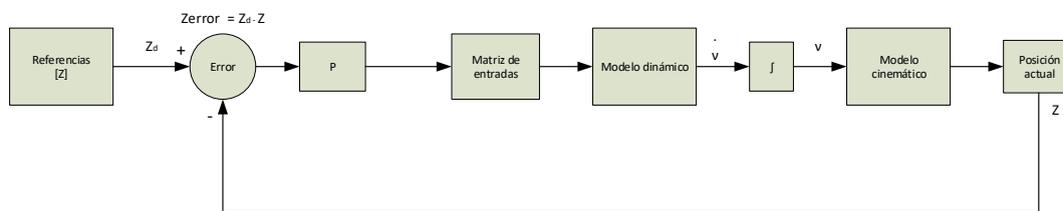


Fig. 6.9: esquema de control para el sistema desacoplado de Z .

En primer lugar se procede a simular el control en X-Y, observando la trayectoria del robot hacia una coordenada (x,y) indicada.

En la figura 6.10 se presenta el resultado obtenido al simular un punto deseado $(15,15)$ utilizando Simulink. En esta imagen se puede dar cuenta de que este no alcanza el objetivo final en el tiempo de simulación usado.

Los datos utilizados para esta simulación se presentan en la tabla 6.3.

Tabla 6.3: datos utilizados en la simulación de objetivo en plano X-Y.

Datos utilizados en simulación x-y	
Punto deseado en x	15
Punto deseado en y	15
Solver	<i>Ode3</i>
Paso	$1e - 4$
Tiempo de simulación	100 segundos
K_p ángulo	25
K_p velocidad	200
K_d ángulo	1

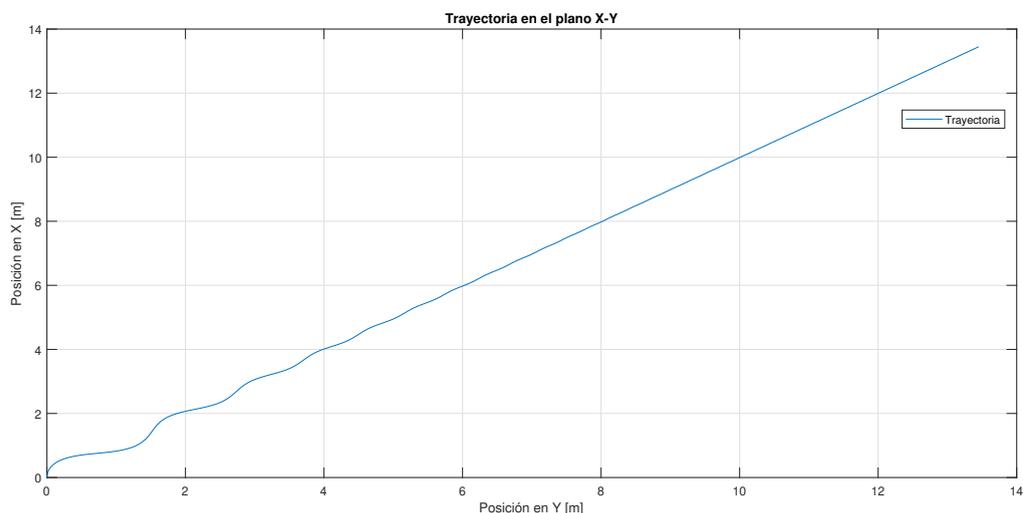


Fig. 6.10: simulación de control de posición en el plano X-Y, con referencia en $X = 15$, $Y = 15$.

En la figura 6.11 se presenta la respuesta de control en Z obteniendo resultados satisfactorios. En la tabla 6.4 se muestran los datos utilizados para esta simulación.

Tabla 6.4: datos utilizados en la simulación para alcance de objetivo en Z .

Datos utilizados para simulación en Z	
Punto deseado en z	-5
Solver	<i>Ode3</i>
Paso	$1e - 4$
Tiempo de simulación	100 segundos
$K_p z$	4
$K_p roll$	1

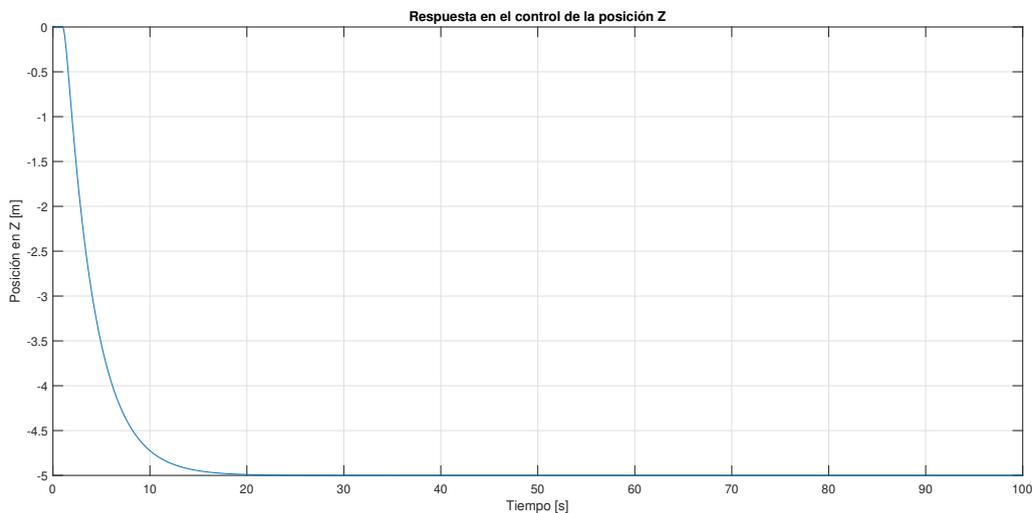


Fig. 6.11: simulación de control de posición Z , con referencia en $z = -5$.

Luego de simular un punto como objetivo final, se implementa un código para demostrar que el vehículo puede seguir varios puntos según se indique. Para esto se dan coordenadas de tal manera que formen un rectángulo. Se realizan pruebas con distintos valores de ganancia para K_p en X-Y. La figura 6.12 esta ejecutada para obtener el menor error en trayectoria posible. Sin embargo, su costo en tiempo es alto. La tabla 6.5 resume los datos utilizados.

Tabla 6.5: datos utilizados para simulación de trayectoria en el plano X-Y con $K_p = 200$.

Datos utilizados en trayectoria X-Y (prueba 1)	
Coordenadas utilizadas	[3, 3]; [8, 3]; [8, 12]; [3, 12]; [3, 3]
Paso	0.1
Tiempo total de investigación	1357 segundos
criterio de convergencia	0.05(m)
error	0.05(m)
K_p ángulo	25
K_p velocidad	200

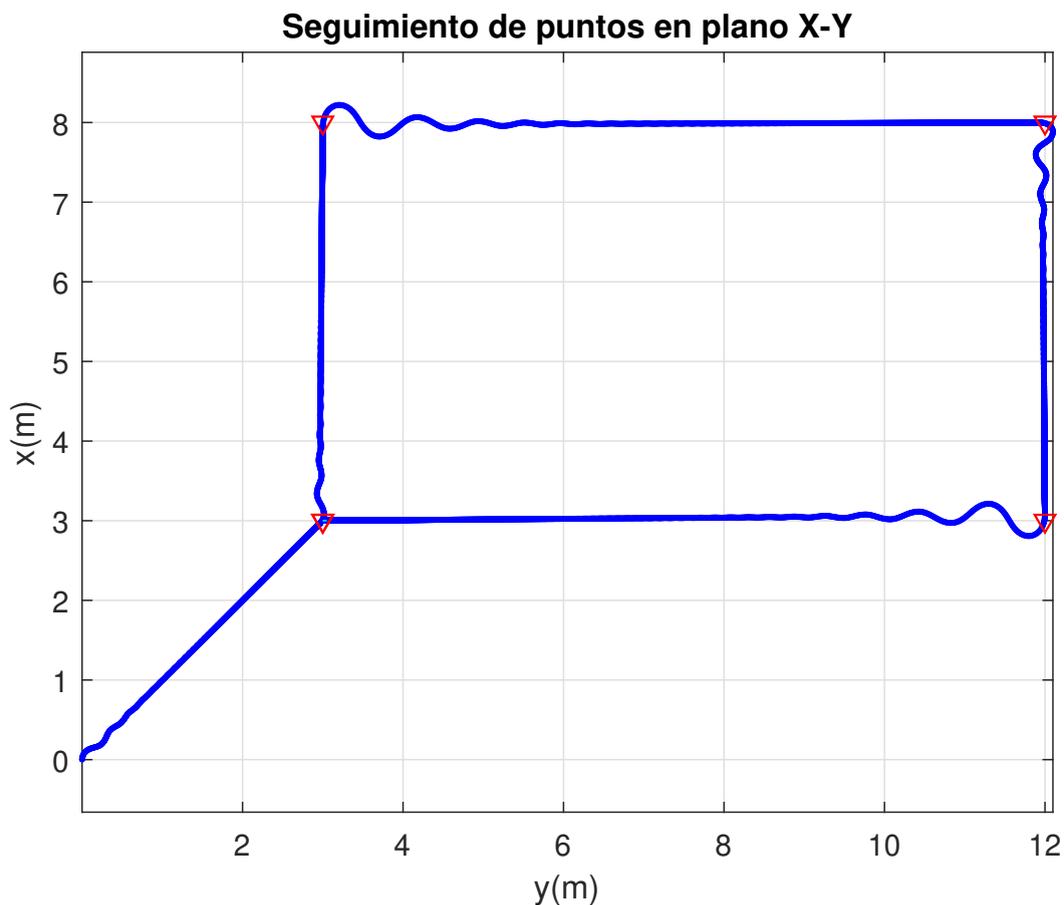


Fig. 6.12: control de trayectoria por puntos en plano X-Y con $K_p=200$.

Al igual que en la figura 6.12 en la figura 6.13 se presenta esta trayectoria rectangular

pero modificando la ganancia K_p para aumentar la velocidad de investigación del vehículo. EN la tabla 6.6 se presentan los datos utilizados en esta simulación.

Tabla 6.6: datos utilizados para simulación de trayectoria en el plano X-Y con $K_p = 1000$.

Datos utilizados en trayectoria X-Y (prueba 2)	
Coordenadas utilizadas	[3, 3]; [8, 3]; [8, 12]; [3, 12]; [3, 3]
Paso	0.1
Tiempo total de investigación	306.10 segundos
criterio de convergencia	0.05(m)
error	0.05(m)
K_p ángulo	25
K_p velocidad	1000

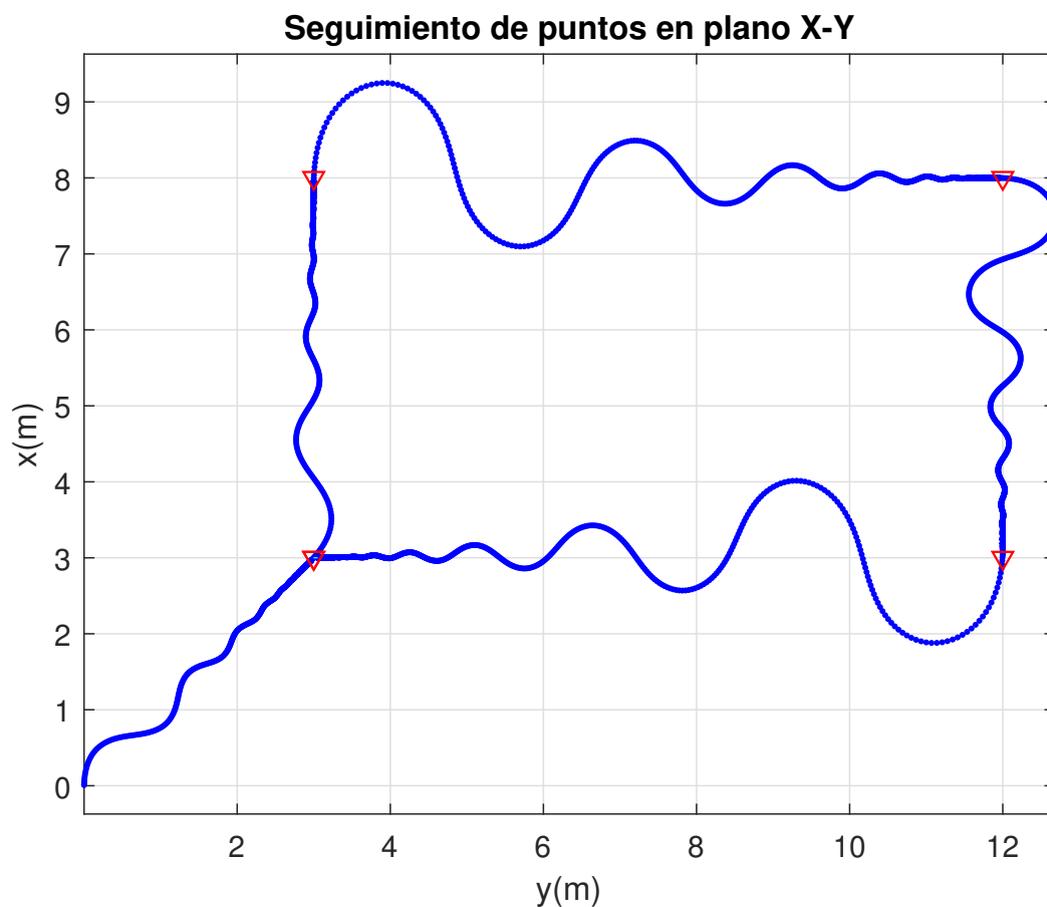


Fig. 6.13: control de trayectoria por puntos en plano X-Y con $K_p=1000$.

6.4. Discusión de resultados

Los resultados que se obtienen en las simulaciones cumplen con lo propuesto; controlar las coordenadas (x,y,z) . En primera instancia se simula el sistema para un solo punto el cual en un tiempo de 100 segundos en simulink no alcanza llegar la coordenada deseada $x_d = 15$, $y_d = 15$. Esto puede ser ajustado mediante la ganancia K_p utilizada en el control de velocidad del algoritmo, aumentando tanto la velocidad a la que se desplaza el vehículo como el error en la trayectoria. Por otra parte, la simulación del movimiento en el eje Z se comporta como se espera, y su control es realizado en paralelo y con otro algoritmo, ya que se realiza un desacople del sistema utilizando los propulsores orientados verticalmente solo para el desplazamiento en Z .

Finalmente se realiza un algoritmo para simular el desplazamiento del vehículo a través del seguimiento de puntos en un plano XY , debido a que es en este plano donde el control de posición es más complejo en este caso. Se dan coordenadas y este logra alcanzarlas con éxito. En este punto se varía la ganancia del control P de velocidad para identificar diferencias de errores y el tiempo de finalización de la investigación.

7. Conclusiones

7.1. Introducción

En este capítulo se comenta de forma breve las etapas más relevantes que fueron realizadas, luego se describen los resultados obtenidos y se contrastan con los objetivos y finalmente se comentan los posibles trabajos que pueden ser realizados para continuar con el desarrollo de este proyecto.

7.2. Sumario

Para comenzar con este proyecto se realizó una investigación sobre los tipos de vehículos submarinos en robótica que existen, tipos de diseños, propulsores, como estos se clasifican, tecnologías y hardware que estos utilizan y las estrategias de control más usadas, donde luego se analiza esta información y se consideran las más adecuadas para el desarrollo del proyecto. Continuando con la planificación se estableció un objetivo general, objetivos específicos y una metodología o pasos para lograr el objetivo planteado.

Luego de terminar con la planificación del proyecto se continúa con un marco teórico en donde se analizan las ecuaciones que definen este tipo de sistemas, para continuar con una memoria de cálculo de empujes y potencia necesaria según la geometría diseñada, además de proponer un sistema de viraje. Una vez aclarado lo anterior se procedió a la etapa de fabricación basándose en un diseño CAD previamente modelado.

Al obtener una estructura física, se continúa con la selección de componentes de electrónica que serán necesarios para trabajos futuros como puesta en marcha, entregando además planos de conexión para esta. Finalmente, se implementó un algoritmo de control de posición realizando simulaciones y se presentaron los resultados obtenidos con un breve análisis de estos.

7.3. Conclusiones

Se obtiene un modelo matemático que finalmente es desacoplado para trabajar con dos sistemas independientes. Esto provoca que el trayecto ocurra en secuencia, funcionando un sistema de control y luego el otro. No obstante, esto puede ser solucionado en la práctica con un microcontrolador que permita realizar operaciones en paralelo y de forma independiente.

Las simulaciones en ANSYS ayudan a contrastar el resultado de los empujes obtenidos mediante el cálculo por el método de coeficiente de arrastre, la diferencia entre estos es de $10.8(N)$, mientras que la hélice diseñada es de $10(N)$. Estos cálculos son medidos a una velocidad simulada de $0.5(m/s)$.

Se logró diseñar y luego fabricar un prototipo de $390x330x100(mm)$, además de un sistema de timón desarmable de $178x110x138(mm)$. Para la fabricación se utilizó fibra de vidrio e impresiones 3D (ABS). Este dispositivo es completamente sumergible.

Se estima que este dispositivo podría un tiempo de navegación de 18 minutos, considerando una batería de 4.5(Ah) y un consumo total de 166.5(W). Sin embargo, este tiempo podría ser mayor debido a que no se pretende operar a altas velocidades.

Finalmente se logra controlar la posición del vehículo en las coordenadas x, y, z , tanto para un objetivo específico como para distintos puntos generando una trayectoria. Se varían las ganancias K_p para aumentar y disminuir la velocidad de avance y tiempo total de trayectoria. Los resultados arrojan que al utilizar un criterio de error de 0.05(m) a una ganancia baja ($K_p = 200$) pero más precisa el tiempo es 4.4 veces más que al utilizar una ganancia alta ($K_p = 1000$). En segundos esta diferencia es de 1050.9(s). No obstante, en el primer caso se obtiene un mejor seguimiento en trayectoria, mientras que en el segundo una respuesta más oscilante. Por último, al disminuir el criterio de error y acercarlo cada vez a 0, el tiempo de navegación aumenta.

7.4. Trabajos futuros

Los resultados obtenidos consideran al prototipo como funcional en el sentido de que puede ser puesto a pruebas en el agua, por lo que es sumergible y cuenta con los actuadores necesarios para desplazarse en X, Y, Z, contando también con los elementos necesarios para este ser programado. Sin embargo, aún se pueden mejorar algunas características y agregar más funcionalidades, esto posibilita una gran cantidad de trabajos futuros dentro de los cuales se encuentran:

- Implementar un sistema de comunicación entre usuario y vehículo, incorporando una interfaz y un sistema de navegación.
- Programación del microcontrolador e interacción con componentes y actuadores, incluyendo un joystick de comando para estos.
- Incorporación de una cámara de video, con un sistema de iluminación y realizar procesamiento de imágenes.
- Re-diseño y propuesta de impermeabilidad en encamisado.
- Re-diseño de pestaña de junta, proponiendo un cierre que no interfiera con el diseño original.
- Reducir el tamaño de sistema de timón, buscando una solución donde el servomotor se encuentre dentro de la estructura para evitar interferir con el diseño.
- Obtener parámetros del modelo del sistema (hidrodinámicos, físicos, propulsores, etc.).
- Implementar una estrategia de control más compleja.
- Pasar de un vehículo tipo ROV a uno tipo AUV.

Referencias

- [1] H. Moreno Avalos, *Modelado, control y diseño de robots submarinos de estructura paralela con impulsores vectorizados*. PhD thesis, Industriales, 2013.
- [2] G. Antonelli, S. Chiaverini, N. Sarkar, and M. West, “Adaptive control of an autonomous underwater vehicle: experimental results on odin,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 9, no. 5, pp. 756–765, 2001.
- [3] C. Á. Arocha, E. Y. Rodríguez, R. S. Pazmiño, and R. A. Santoja, “Control teleoperado del robot submarino de estructura paralela remo,” *Universidad Politécnica de Madrid, Paper Could be consulted at: <http://www.aurova.ua.es>*, vol. 8080.
- [4] R. da Silva Tchilian, E. Rafikova, S. A. Gafurov, and M. Rafikov, “Optimal control of an underwater glider vehicle,” *Procedia Engineering*, vol. 176, pp. 732–740, 2017.
- [5] S. A. Jenkins, D. E. Humphreys, J. Sherman, J. Osse, C. Jones, N. Leonard, J. Graver, R. Bachmayer, T. Clem, P. Carroll, *et al.*, “Underwater glider system study,” 2003.
- [6] J. A. Alba, L. A. Torres-Méndez, and A. F. Castro, “A bio-inspired undulating robotic fin: Design, development and experimental validation,” in *OCEANS 2017-Anchorage*, pp. 1–4, IEEE, 2017.
- [7] P. Liu, K. He, X. Ou, and R. Du, “Mechanical design, kinematic modeling and simulation of a robotic dolphin,” in *2011 IEEE International Conference on Information and Automation*, pp. 738–743, IEEE, 2011.
- [8] B. Xin, L. Xiaohui, S. Zhaocun, and Z. Yuquan, “A vectored water jet propulsion method for autonomous underwater vehicles,” *Ocean engineering*, vol. 74, pp. 133–140, 2013.
- [9] F. Aguirre, S. Vargas, D. Valdes, and J. Tornero, “State of the art of parameters for mechanical design of an autonomous underwater vehicle,” *International Journal of Oceans and Oceanography*, vol. 11, no. 1, pp. 89–103, 2017.
- [10] R. Ramesh, N. Ramadass, D. Sathianarayanan, N. Vedachalam, and G. Ramadass, “Heading control of rov rosub6000 using non-linear model-aided pd approach,” *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 382–393, 2013.
- [11] T. Ariyachartphadungkit, R. Vanijjirattikhan, and S. Hasegawa, “Implementation of pid posture controller for 6 dof underwater robot,” in *2016 International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC)*, pp. 1–4, IEEE, 2016.
- [12] M. Karkoub, H.-M. Wu, and C.-L. Hwang, “Nonlinear trajectory-tracking control of an autonomous underwater vehicle,” *Ocean Engineering*, vol. 145, pp. 188–198, 2017.
- [13] T. Chatchanayuenyong and M. Parnichkun, “Neural network based-time optimal sliding mode control for an autonomous underwater robot,” *Mechatronics*, vol. 16, no. 8, pp. 471–478, 2006.

- [14] R. V. Giles, J. B. Evett, and C. Liu, *Schaum's outline of fluid mechanics and hydraulics*. McGraw-Hill, 2014.
- [15] J. Carlton, *Marine propellers and propulsion*. Butterworth-Heinemann, 2018.
- [16] M. W. C. Oosterveld, "Wake adapted ducted propellers," tech. rep., 1970.
- [17] D. Benedicto Basallote, "Análisis, diseño y dimensionado del timón de un bulk carrier," B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2016.
- [18] ServoDatabase, "Feetech fs5106b - standard servo," [Online], 2021. <https://servodatabase.com/servo/feetech/fs5106b>.
- [19] AIRTECH, "Infusión de resina," [Online], 2018. <https://www.airtechintl.com/es/node/129>.
- [20] Arduino, "Arduino due," [Online], 2020. <https://arduino.cl/producto/arduino-due/>.
- [21] Aliexpress, "Controlador de velocidad del motor sin escobillas 15a, 500w, tablero controlador bldc con equipo eléctrico de pasillo," [Online], 2020. <https://n9.cl/lrdgc>.
- [22] Robotshop, "Basic 30a esc v3 (w/ forward/reverse firmware)," [Online], 2020. <https://www.robotshop.com/en/basic-30a-esc-v3-forward-reverse-firmware.html>.
- [23] N. Mechatronics, "Tutorial mpu6050, acelerómetro y giroscopio," [Online], 2016. https://naylampmechatronics.com/blog/45_Tutorial-MPU6050-Aceler%C3%B3metro-y-Giroscopio.html.
- [24] Aliexpress, "Cable de brida cuadrada sp28 ip68 conector de aviación resistente al agua 2/3/4/5/6/7/9/10/12/14/16/19/22/24/26 pin enchufe eléctrico," [Online], 2020. <https://n9.cl/8bpo>.
- [25] mcielectronics, "Batería li-ion 3.7v 18650 2600mah recargable," [Online], 2020. <https://n9.cl/seft>.
- [26] XRCHobbies, "Reedy wolfpack gen2 3s hard case lipo battery pack 35c (11.1v/4500mah)," [Online], 2020. <https://n9.cl/4s0n>.
- [27] W. Wang, R. Engelaar, X. Chen, and J. Chase, "The state-of-art of underwater vehicles-theories and applications," 2009.
- [28] B. Siciliano and O. Khatib, *Springer handbook of robotics*. Springer, 2016.
- [29] T. SNAME, "Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid," *The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Technical and Research Bulletin No*, pp. 1–5, 1950.
- [30] D. Valdés Ruiz, "Estado del arte en robótica submarina," 2015.

- [31] L. G. García-Valdovinos, T. Salgado-Jiménez, M. Bandala-Sánchez, L. Nava-Balanzar, R. Hernández-Alvarado, and J. A. Cruz-Ledesma, “Modelling, design and robust control of a remotely operated underwater vehicle,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 11, no. 1, p. 1, 2014.
- [32] S. Wadoo and P. Kachroo, *Autonomous underwater vehicles: modeling, control design and simulation*. CRC Press, 2017.
- [33] X. Lin, S. Guo, C. Yue, and J. Du, “3d modelling of a vectored water jet-based multi-propeller propulsion system for a spherical underwater robot,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, no. 1, p. 80, 2013.
- [34] M. Blanke, K.-P. Lindegaard, and T. I. Fossen, “Dynamic model for thrust generation of marine propellers,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 33, no. 21, pp. 353–358, 2000.
- [35] Y. Qiu, C. Zhou, Z. Gao, and C. Kang, “A small variable buoyancy system for underwater vehicles,” in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1074, p. 012108, 2018.
- [36] R. S. Pazmiño, C. E. G. Cena, C. A. Arocha, and R. A. Santonja, “Experiences and results from designing and developing a 6 dof underwater parallel robot,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 59, no. 2, pp. 101–112, 2011.
- [37] C. Zhou, M. Tan, Z. Cao, S. Wang, D. Creighton, N. Gu, and S. Nahavandi, “Kinematic modeling of a bio-inspired robotic fish,” in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 695–699, IEEE, 2008.
- [38] B. Bayat, A. Crespi, and A. Ijspeert, “Envirobot: A bio-inspired environmental monitoring platform,” in *2016 Ieee/Oes Autonomous Underwater Vehicles (Auw)*, pp. 381–386, Ieee, 2016.
- [39] M. Krieg, C. Coley, C. Hart, and K. Mohseni, “Synthetic jet thrust optimization for application in underwater vehicles,” in *Proc. 14th Int. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST)(Durham, NH, 21–24 August 2005)*, Citeseer, 2005.
- [40] A. Thomas, M. Milano, M. G. G’Sell, K. Fischer, and J. Burdick, “Synthetic jet propulsion for small underwater vehicles,” in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 181–187, IEEE, 2005.
- [41] D. Choi and C. Knight, “Application of scalar implicit approximate factorization for underwater magnetohydrodynamic propulsion concept analyses,” *AIAA journal*, vol. 31, no. 2, pp. 286–293, 1993.
- [42] T. Lin, J. Gilbert, and G. Roy, “Analyses of magnetohydrodynamic propulsion with seawater for underwater vehicles,” *Journal of Propulsion and Power*, vol. 7, no. 6, pp. 1081–1083, 1991.
- [43] H. A. Moreno, R. Saltarén, L. Puglisi, I. Carrera, P. Cárdenas, and C. Álvarez, “Robótica submarina: Conceptos, elementos, modelado y control,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 11, no. 1, pp. 3–19, 2014.

- [44] C. T. Ross, “A conceptual design of an underwater vehicle,” *Ocean Engineering*, vol. 33, no. 16, pp. 2087–2104, 2006.
- [45] A. Dehghani-Sani, E. Tharumalingam, M. Dusseault, and R. Fraser, “Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 104, pp. 192–208, 2019.
- [46] J. Yuh, “Design and control of autonomous underwater robots: A survey,” *Autonomous Robots*, vol. 8, no. 1, pp. 7–24, 2000.
- [47] D. Mecerreyes, L. Porcarelli, and N. Casado, “Innovative polymers for next-generation batteries,” *Macromolecular Chemistry and Physics*, vol. 221, no. 4, p. 1900490, 2020.
- [48] K. M. B. Lee, C. Yoo, B. Hollings, S. Anstee, S. Huang, and R. Fitch, “Online estimation of ocean current from sparse gps data for underwater vehicles,” in *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3443–3449, IEEE, 2019.
- [49] J. H. Kepper IV, B. C. Claus, and J. C. Kinsey, “A navigation solution using a mems imu, model-based dead-reckoning, and one-way-travel-time acoustic range measurements for autonomous underwater vehicles,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 44, no. 3, pp. 664–682, 2018.
- [50] Y. Wu, X. Ta, R. Xiao, Y. Wei, D. An, and D. Li, “Survey of underwater robot positioning navigation,” *Applied Ocean Research*, vol. 90, p. 101845, 2019.
- [51] J. Śliwka, R. Petroccia, A. Munafò, and V. Djapic, “Experimental evaluation of net-lbl: An acoustic network-based navigation system,” in *OCEANS 2017-Aberdeen*, pp. 1–9, IEEE, 2017.
- [52] N. Y. Ko, D. Jeong, and G. Song, “Navigation of a remotely operated underwater vehicle using imu and dvl,” in *2019 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp. 1098–1100, IEEE, 2019.
- [53] J. Reis, M. Morgado, P. Batista, P. Oliveira, and C. Silvestre, “Design and experimental validation of a usbl underwater acoustic positioning system,” *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1491, 2016.
- [54] Y. R. Petillot, G. Antonelli, G. Casalino, and F. Ferreira, “Underwater robots: From remotely operated vehicles to intervention-autonomous underwater vehicles,” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 26, no. 2, pp. 94–101, 2019.
- [55] B. Ouyang, F. Dalglish, S. Negahdaripour, and A. Vuorenkoski, “Experimental study of underwater stereo via pattern projection,” in *2012 Oceans*, pp. 1–7, IEEE, 2012.
- [56] S. Ohata, Y. Eriguchi, and K. Ishii, “Aquabox series: small underwater robot systems for shallow water observation,” in *2007 Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*, pp. 314–319, IEEE, 2007.

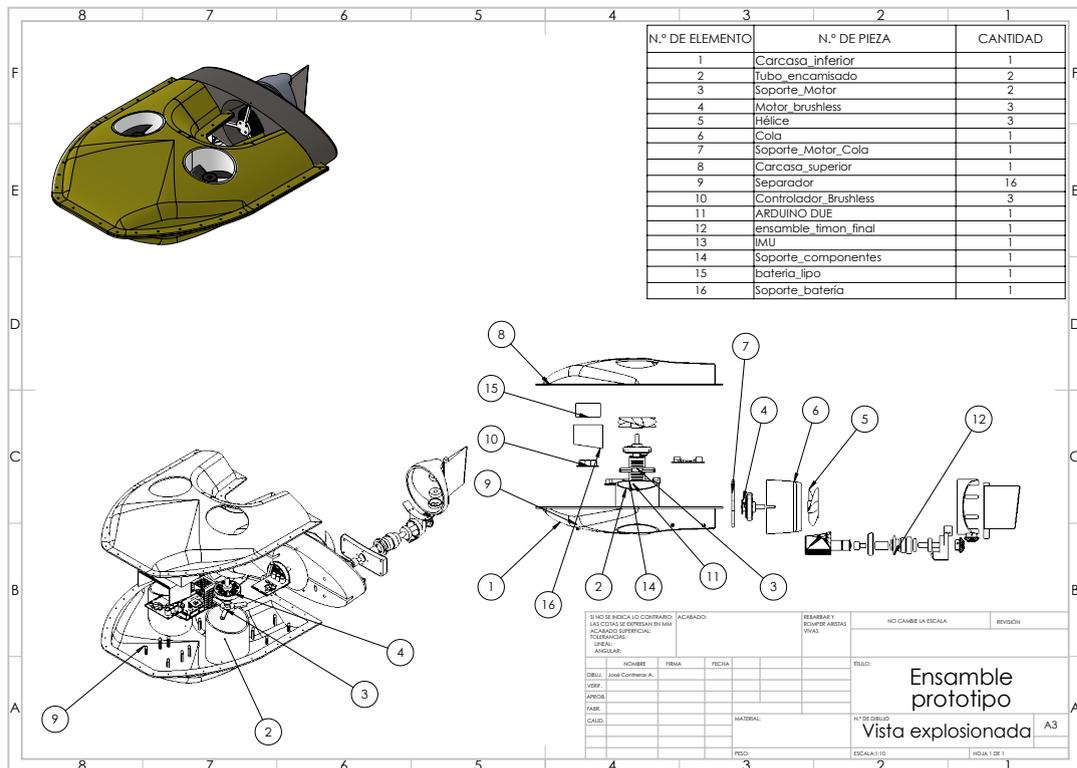
- [57] M. Carreras, P. Ridaio, R. García, D. Ribas, and N. Palomeras, “Inspección visual subacuática mediante robótica submarina,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 9, no. 1, pp. 34–45, 2012.
- [58] T. I. Fossen, “Marine control systems—guidance, navigation, and control of ships, rigs and underwater vehicles,” *Marine Cybernetics, Trondheim, Norway, Org. Number NO 985 195 005 MVA*, *www.marinecybernetics.com*, ISBN: 82 92356 00 2, 2002.
- [59] K. P. Valavanis, D. Gracanin, M. Matijasevic, R. Kolluru, and G. A. Demetriou, “Control architectures for autonomous underwater vehicles,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 17, no. 6, pp. 48–64, 1997.
- [60] M. N. Mahyuddin and M. R. Arshad, “Classes of control architectures for auv: A brief survey,” in *Proceedings of the 2nd International Conference on Underwater system technology, Bali Indonesia*, 2008.
- [61] T. Kim and J. Yuh, “Development of a real-time control architecture for a semi-autonomous underwater vehicle for intervention missions,” *Control Engineering Practice*, vol. 12, no. 12, pp. 1521–1530, 2004.
- [62] N. Mahmoudian and C. Woolsey, “Underwater glider motion control,” in *2008 47th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 552–557, IEEE, 2008.
- [63] M. Santhakumar and T. Asokan, “Investigations on the hybrid tracking control of an underactuated autonomous underwater robot,” *Advanced Robotics*, vol. 24, no. 11, pp. 1529–1556, 2010.
- [64] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación, 2003.
- [65] P. H. Lewis and C. Yang, *Sistemas de control en ingeniería*, vol. 400. prentice hall, 1999.
- [66] L. Lapierre, D. Soetanto, and A. Pascoal, “Nonlinear path following with applications to the control of autonomous underwater vehicles,” in *42nd IEEE International Conference on Decision and Control (IEEE Cat. No. 03CH37475)*, vol. 2, pp. 1256–1261, IEEE, 2003.
- [67] T. I. Fossen and S. I. Sagatun, “Adaptive control of nonlinear underwater robotic systems,” 1991.
- [68] J. Yuh, “Modeling and control of underwater robotic vehicles,” *IEEE Transactions on Systems, man, and Cybernetics*, vol. 20, no. 6, pp. 1475–1483, 1990.
- [69] R. Galán, A. Jiménez, R. Sanz, and F. Matía, “Control inteligente,” *Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, vol. 4, no. 10, pp. 43–48, 2000.
- [70] M. Santos, “Un enfoque aplicado del control inteligente,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 8, no. 4, pp. 283–296, 2011.
- [71] J. Yuh, “A neural net controller for underwater robotic vehicles,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 161–166, 1990.

- [72] J. Yuh, “An adaptive and learning control system for underwater robots,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 29, no. 1, pp. 145–150, 1996.
- [73] H. Leung and S. Haykin, “The complex backpropagation algorithm,” *IEEE Transactions on signal processing*, vol. 39, no. 9, pp. 2101–2104, 1991.
- [74] M.-j. Zhang and Z.-z. Chu, “Adaptive sliding mode control based on local recurrent neural networks for underwater robot,” *Ocean Engineering*, vol. 45, pp. 56–62, 2012.
- [75] A. P. GALLEGUILLOS GODOY, “Diseño e implementación de máquina de limpieza submarina para la industria salmonera,” 2019.
- [76] G. Robles Carrasco *et al.*, “Diseño y estudio hidrodinámico de un submarino autónomo no tripulado: Auv,” 2015.
- [77] J. Van Manen, “Wake adapted ducted propellers,” *Wageningen: H. Veenman & Zonen*, 1970.
- [78] Z. Liu, S. Guo, H. Li, and X. Lin, “An improved 3d modeling of water-jet propellers for a spherical underwater robot,” in *2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 319–324, IEEE, 2011.
- [79] G. Parra Vera, “Ante-proyecto de barcaza mayor de acero destinada al transporte de alimento para la industria acuícola.,” 2015.
- [80] R. L. Mott, *Mecánica de Fluidos 6/e*. Pearson educación, 2006.
- [81] I. Di Guiseppe Mendoza, “Desarrollo y caracterización de nuevos recubrimientos poliméricos reforzados con fibras de vidrio para aplicaciones en la energía,” Master’s thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2020.
- [82] M. H. Bakr, J. W. Bandler, K. Madsen, and J. Søndergaard, “An introduction to the space mapping technique,” *Optimization and Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 369–384, 2001.
- [83] C. C. Ocampo, J. G. Arias, J. F. Mena, and A. de Puebla, “Modelo dinámico y control de posición de un robot submarino operado a distancia rov,”
- [84] T. I. Fossen *et al.*, *Guidance and control of ocean vehicles*, vol. 199. Wiley New York, 1994.
- [85] R. Calvo *et al.*, “Modelado, simulación y control de un vehículo submarino manipulado de forma remota (rov),” 2015.
- [86] G. Klancar, A. Zdesar, S. Blazic, and I. Skrjanc, *Wheeled mobile robotics: from fundamentals towards autonomous systems*. Butterworth-Heinemann, 2017.
- [87] J. Vervoort, “Modeling and control of an unmanned underwater vehicle,” *Master Traineesh. Rep*, pp. 5–15, 2009.

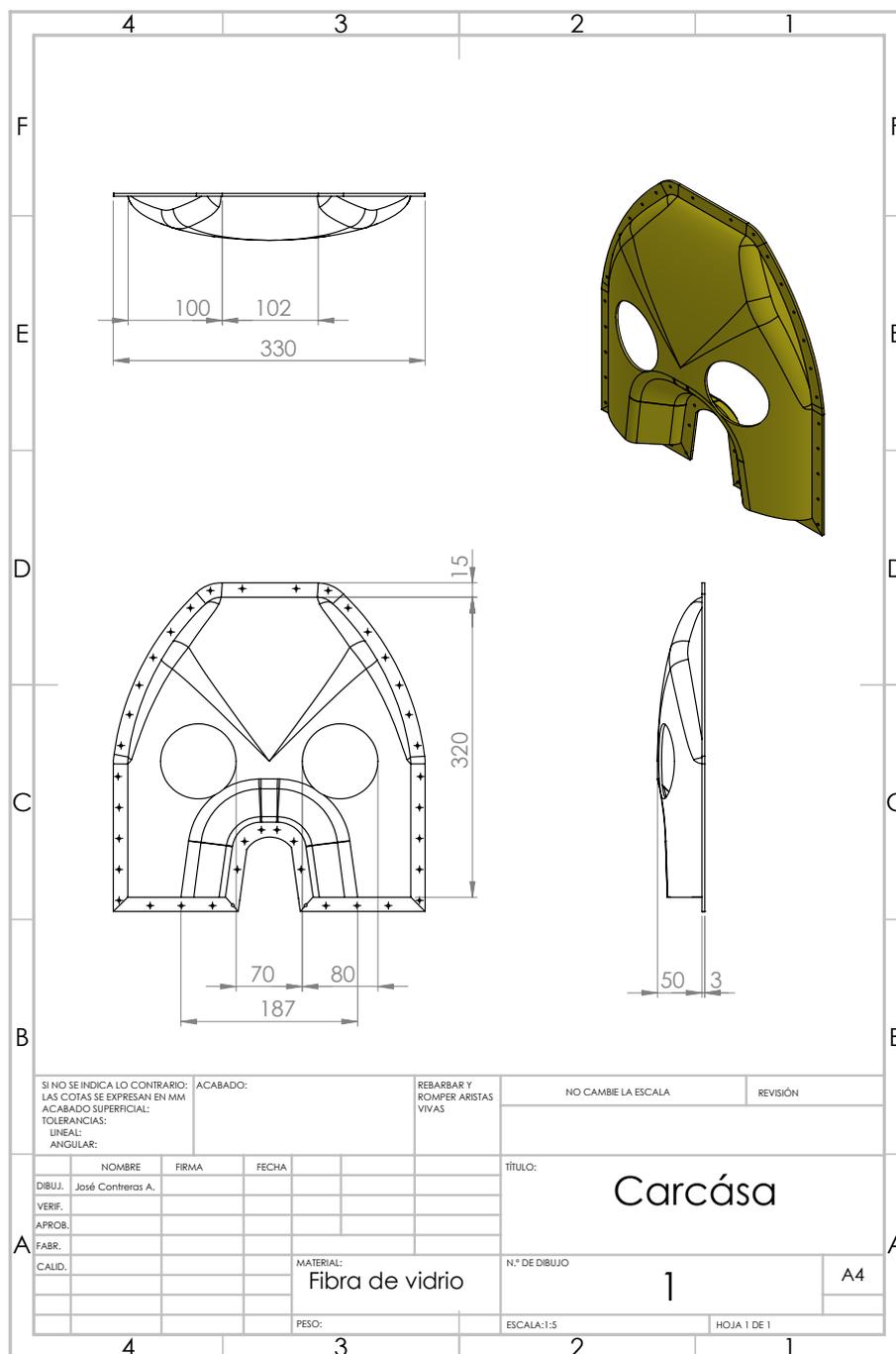
Anexos

A. Planos de diseño del prototipo

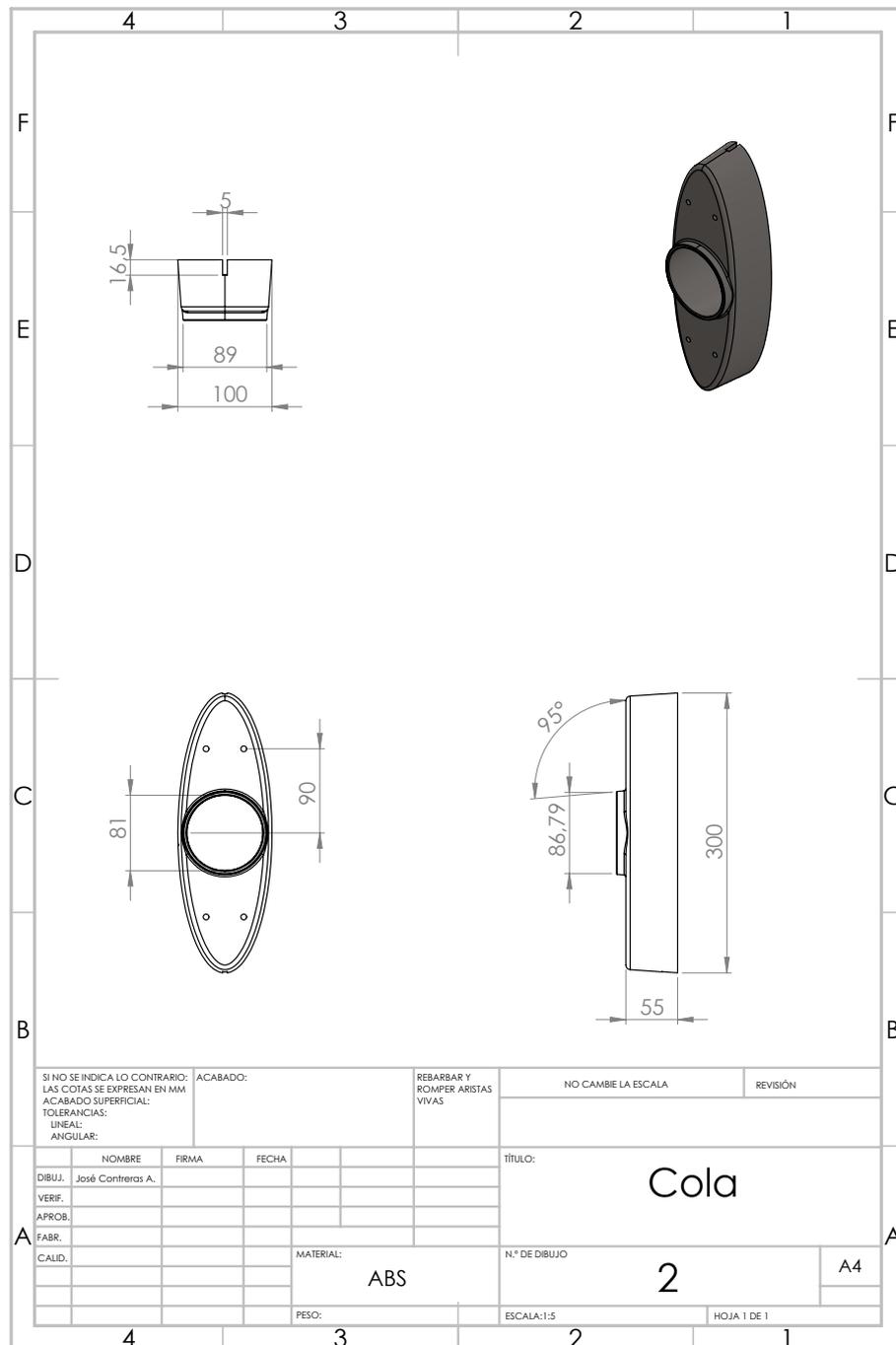
A.1. Plano vista explosionada



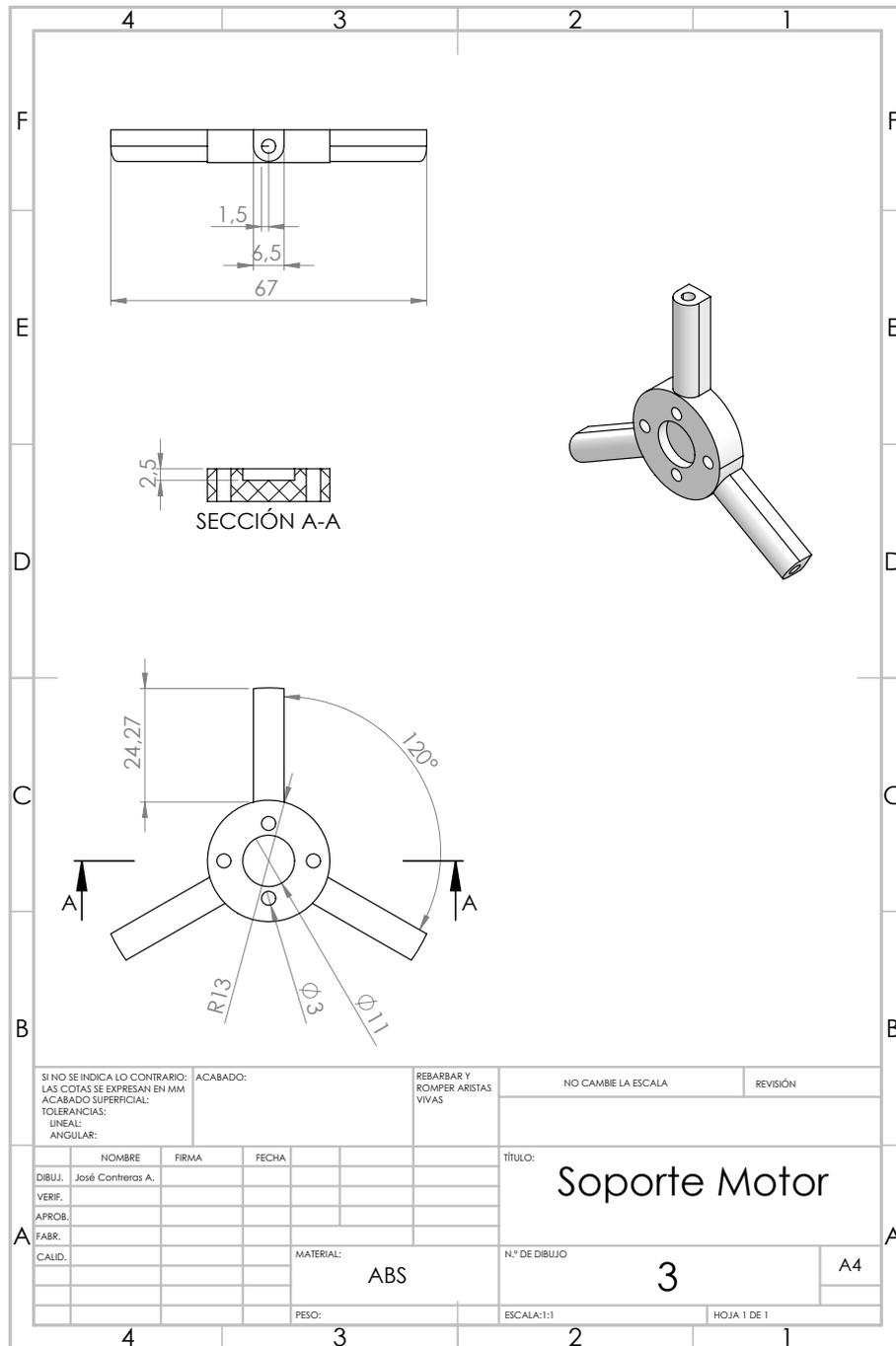
A.2. Plano de carcasa



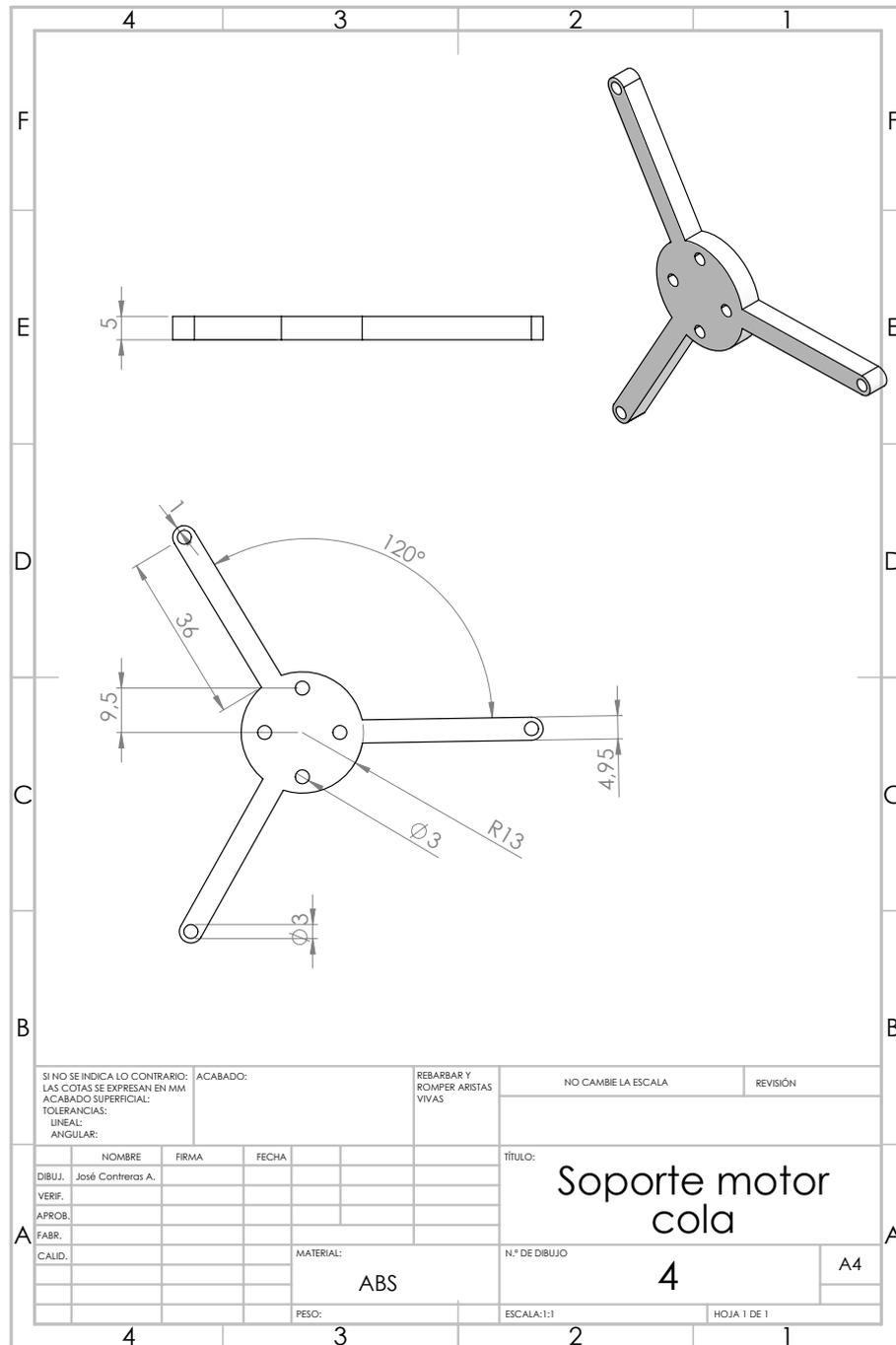
A.3. Plano de cola



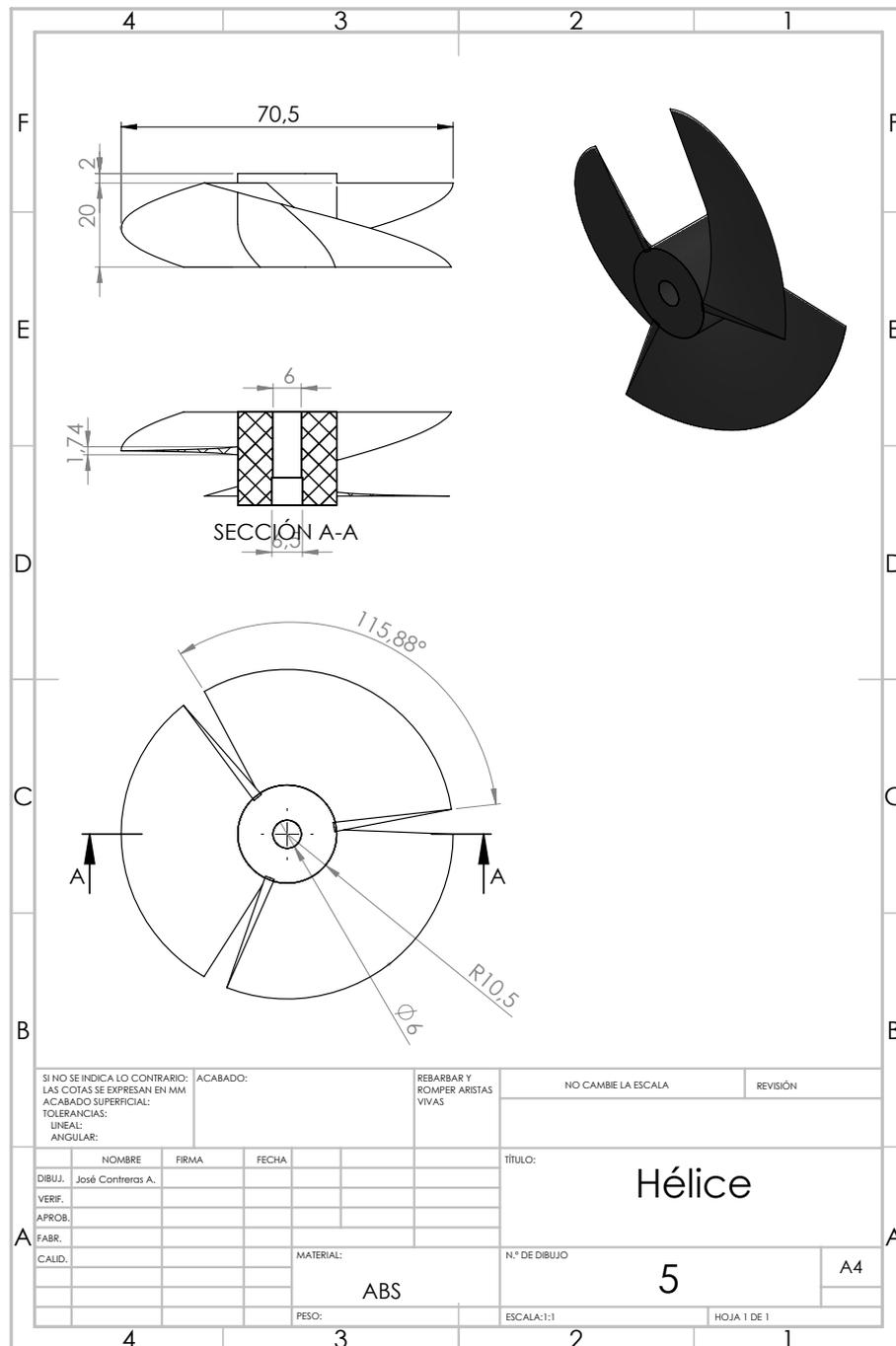
A.4. Plano de soporte motor



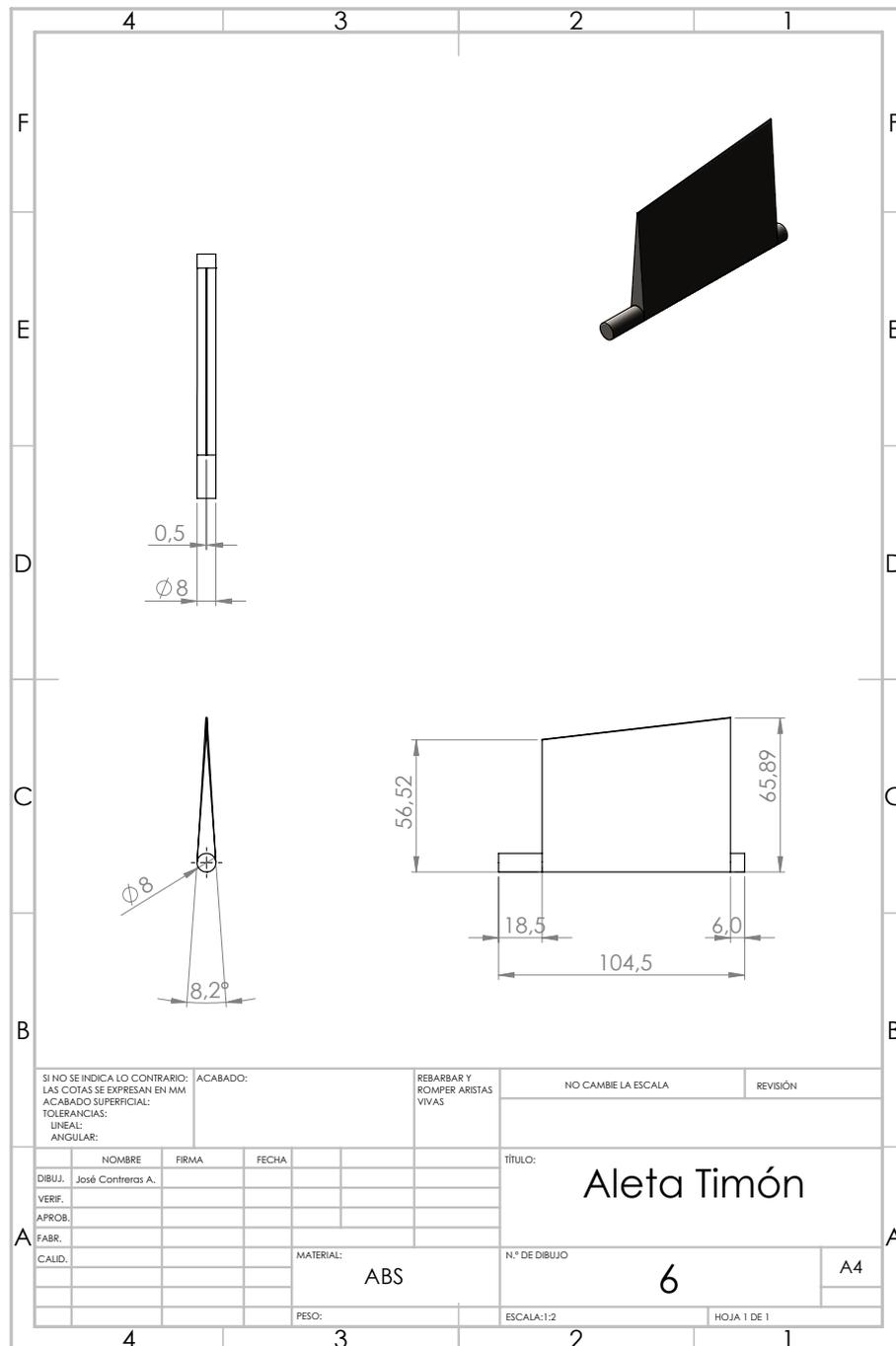
A.5. Plano de soporte motor de cola



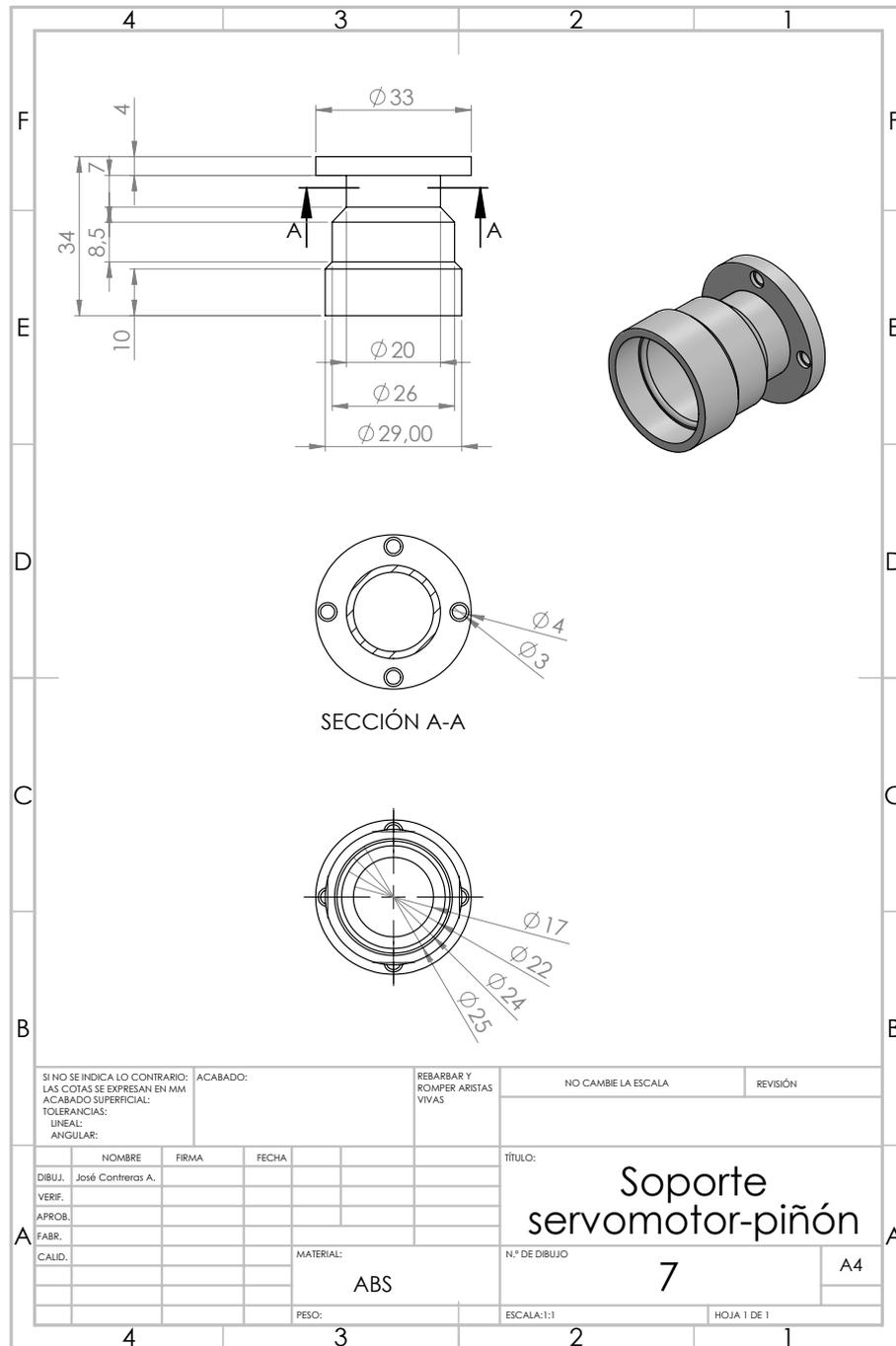
A.6. Plano de hélice



A.7. Plano de timón

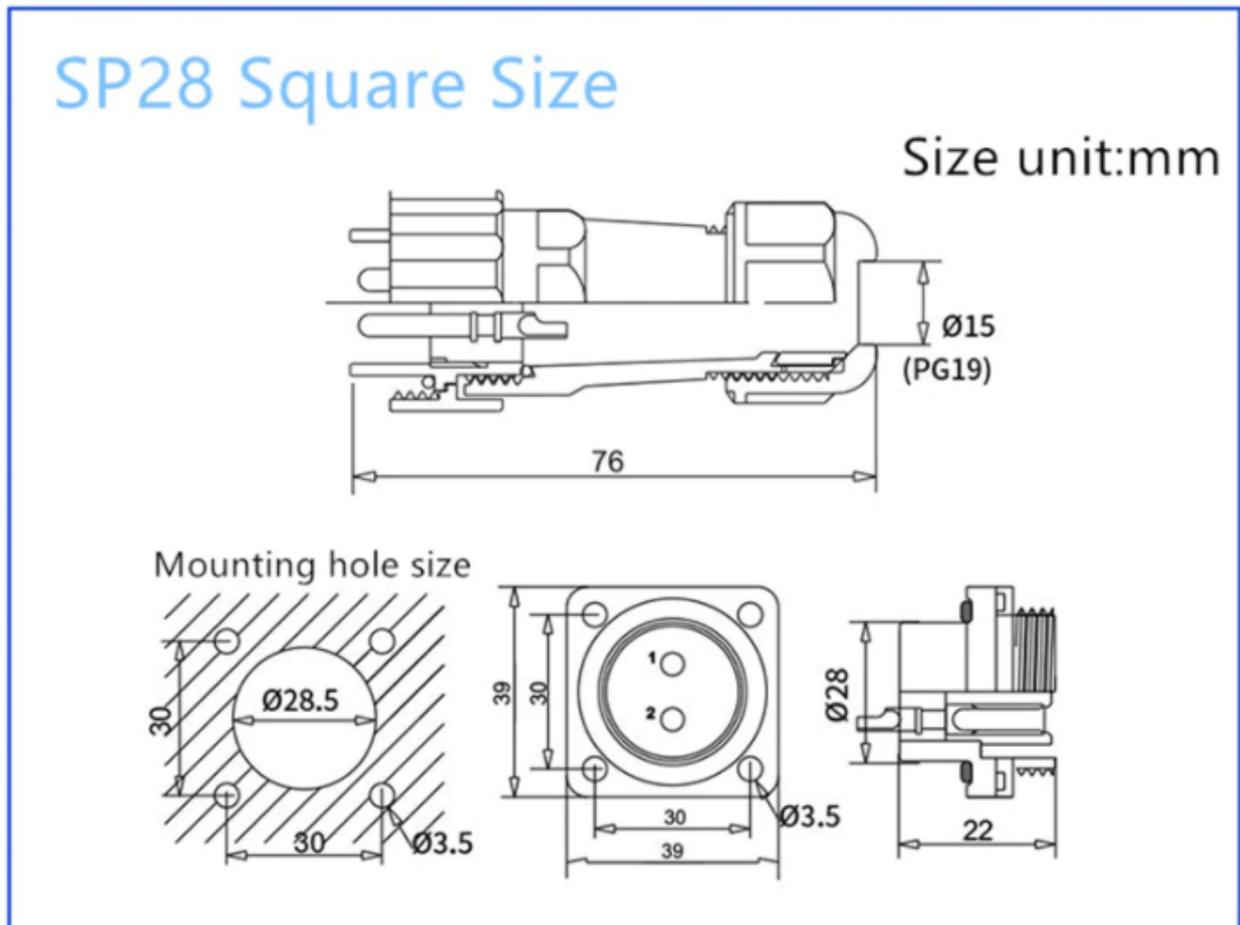


A.8. Plano acople servo-piñon



B. Especificaciones de dispositivos electrónicos

B.1. Conector SP28-6S



Especificaciones Técnicas	
Modelo	SP28-6S
Diametro de contacto ($\varnothing mm$)	2.8x6
Rango corriente (A)	25A
Rango voltaje (AC.V)	380V
Test voltaje (AC.V) 1 min	1500V
Contacto/Resistencia (M Ω)	1/2000
Rango de cable (mm)	12-15

B.2. Especificaciones motor brushless

Características

- Carcasa frontal de aluminio mecanizado con cuatro orificios de enfriamiento estilo ventilador, ya que bombean aire a través del motor mientras funciona.
- Orificios de montaje roscados. Agujeros de 16 mm y 19 mm, se adaptan a una variedad de aplicaciones.
- Imanes NdFeB especialmente diseñados, clasificación de alta temperatura para un funcionamiento libre de problemas.
- Se utiliza un cable con clasificación 140°C (356F) para enrollar los motores y minimizar el riesgo de quemarlos.
- Las placas del estator de alta calidad están recubiertas de epoxi en la superficie interior para evitar cortocircuitos de bobinado. Se utiliza una placa de estator 0.20 mm.
- Se utilizan cojinetes de bolas recubiertos, de alta calidad y lubricados para soportar el eje del motor.
- Se utilizan adhesivos de alta temperatura para asegurar los devanados del estator y evitar que se muevan, se pellizquen o se cortocircuiten.

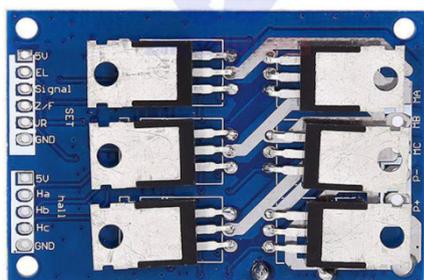
No.	Voltage(V)	Current(A)	Power(W)	RPM/V	Quiet Tensile(g)	Pull/Power(g/w)	Note
1	14	0.2	2.8	1000	81	28.9	
2	14	0.4	5.6	1200	110	19.6	
3	14	0.6	8.4	1400	160	19.0	
4	14	1.1	15.4	1600	220	14.3	
5	14	1.7	23.8	1800	288	12.1	
6	14	2.4	33.6	2000	350	10.4	
7	14	3.4	47.6	2200	430	9.0	
8	14	4.2	58.8	2400	490	8.3	
9	14	5.9	82.6	2600	570	6.9	
10	14	8.5	119	2800	730	6.1	
11	14	10.7	149.8	3000	800	5.3	

Especificaciones Técnicas	
Modelo	D5010-14
Tamaño motor	Ø50 * 10mm
Tamaño eje	Ø3.17
Peso	80g
KV(rpm/v)	360
Batería	2-6Li-Po
ESC	10A
Cable	40cm

Fuente: <http://rctimer.com/?product-1080.html>

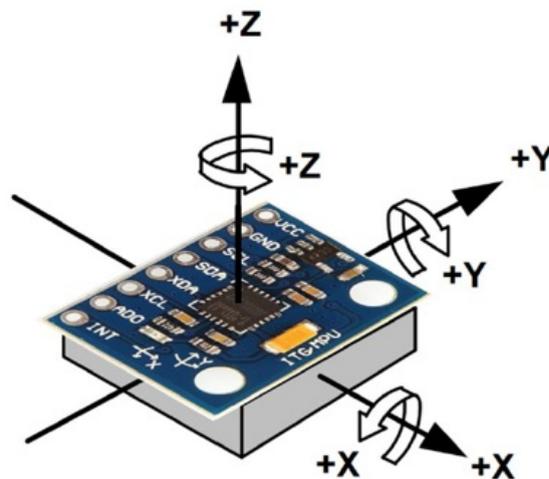
B.3. Especificaciones controlador motor brushless

Especificaciones Técnicas	
Voltaje de funcionamiento	CC 12V-36V
Corriente de funcionamiento	<= 15A
Potencia de controlador	500W
Voltaje de velocidad	0.1V-5V
Temperatura de funcionamiento	-40 a 85C
Humedad	90 %
Protección de parada	Sí
Protección contra sobrecorriente	Sí
Control de dirección	Sí
Señal de control de velocidad	Sí
Tamaño	6.3x4.2*1.7cm (L * W * H)



Especificación de pines		
Terminal de potencia	Ajuste Control	Hall terminales
Vcc: alimentación	GND: tierra control	5V: Potencia positiva Hall
GND: negativo	VR: regulador 0-5V velocidad motor	Ha: Hall señal
MC: fase W motor	ZF: control marcha atrás, cambio de dirección	Hb: Hall señal
MB: fase V motor	M: tacómetro de pulso de salida	Hc: Hall señal
MA: fase U motor	EL: terminal de control de activación	GND: Hall negativo
	5V: terminal de control	

B.4. Sensor MPU6050



Especificaciones Técnicas	
Salida digital	6 ejes
Giroscopio con sensibilidad	$\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000dps$
Acelerómetro con sensibilidad	$\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$
Entrada digital de video	FSYNC
Voltaje de alimentación	2.37 a 3.46V
Voltaje lógico	$1.8V \pm 5\% VDD$

Para obtener más información de especificaciones técnicas, visitar Datasheet en <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>

Para las conexiones que son estándar tipo I2C:

Conexión entre Arduino y MPU6050	
MPU6050	Arduino Mega, DUE
VCC	5V
GND	GND
SCL	21
SDA	20

B.5. Servo-motor FreeTech

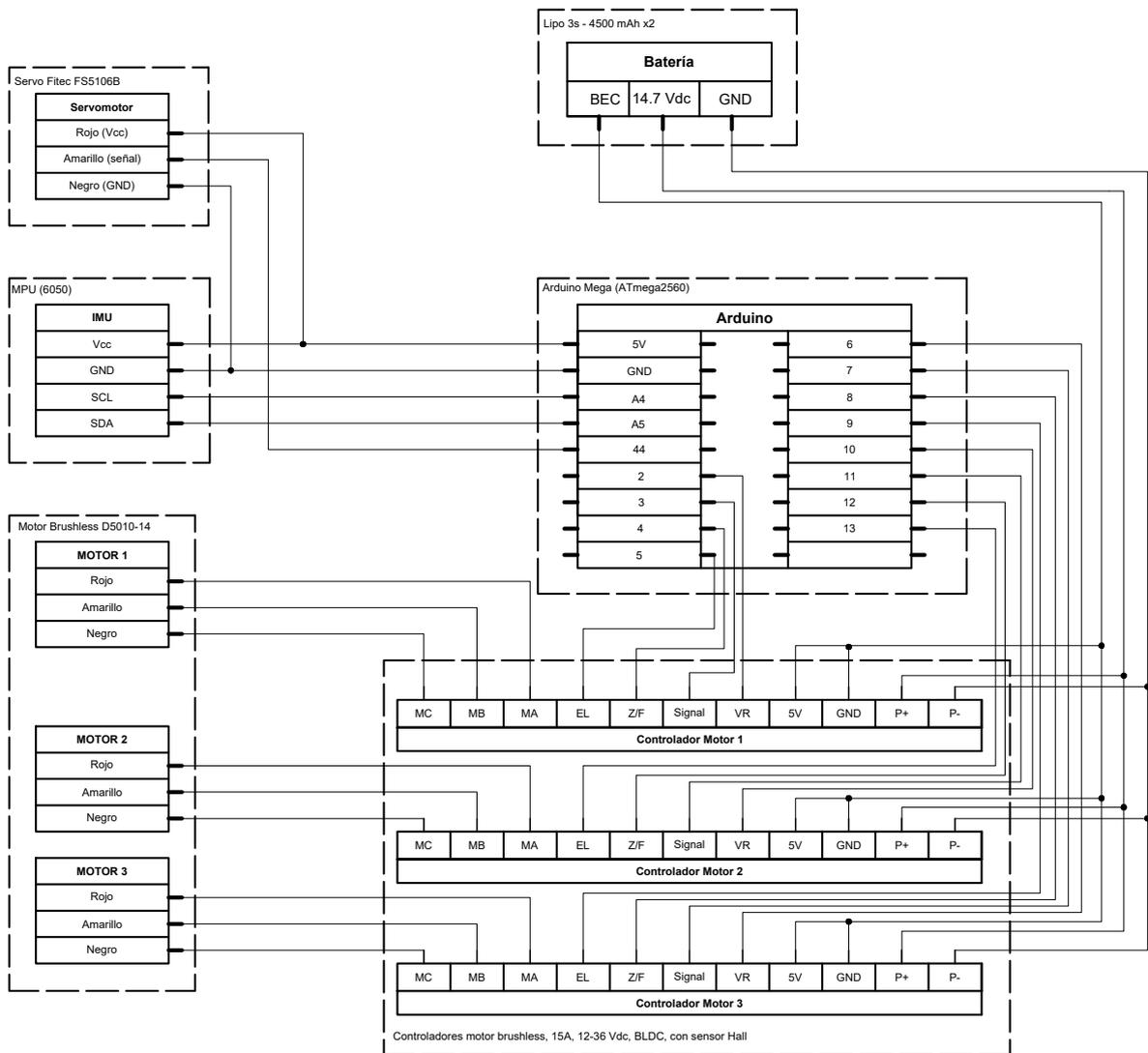
Tabla B.1: especificaciones servomotor.

FreeTech FS5106B - Estándar Servo	
Modulación	Análogo
Torque	4.8V: 5.01 kg-cm 6.0V: 6.01 kg-cm
Velocidad	4.8V: 0.18 sec/60° 6.0V: 0.16 sec/60°
Peso	40 g
Dimensiones	Largo: 40.8 mm Ancho: 20.1 mm Alto: 38.0 mm
Tipo motor	Cepillado
Tipo carcasa	Plastico
Rotación/apoyo	Rodamiento doble
Rango rotación	120°
Ancho pulso	900-2100 us



C. Planos de conexión

C.1. Plano de conexión pin a pin



D. Simulaciones en Ansys

En este apartado se adjuntan los datos obtenidos al igual que procedimiento realizado para la obtención de parámetros de fuerza de arrastre, dado un modelo diseñado en CAD. Para ello se utiliza ANSYS R19.2

D.1. procedimiento en Workbech

Para realizar un proyecto de simulación en ANSYS, se debe abrir la aplicación Workbech de esta, el cual es el entorno de trabajo. Aqui se utiliza en este caso Fluid Flow, este se arrastra hasta la pantalla de trabajo, apareciendo una ventana como la que se muestra en la figura D.1. En esta etapa deberemos de importar el archivo que deseamos trabajar. e ingresar a "Geomtry".

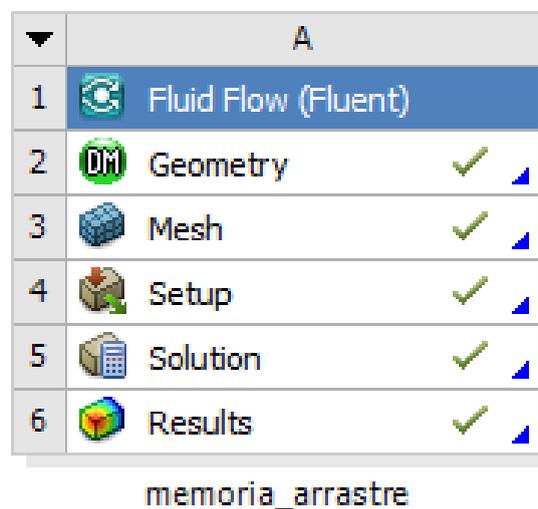


Fig. D.1: creación de proyecto en Ansys.

Dentro de "Geometry" visualizaremos la geometría importada (ver figura D.2) y le aplicaremos un ".enclosure", creando un volumen alrededor de la geometría.

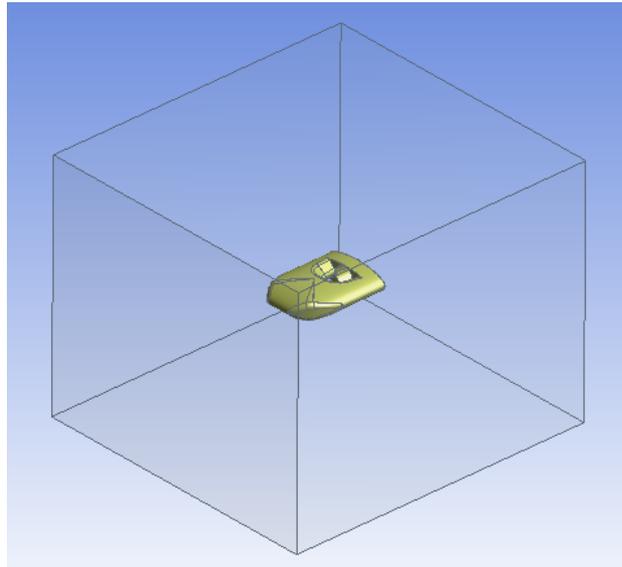


Fig. D.2: vista de geometría importada junto con enclosure.

En la parte izquierda de la pantalla se visualizará el árbol de trabajo, como se muestra en la figura D.3. Aquí veremos el `.Enclosure.aplicado` y los sólidos o geometrías que se han importado con anterioridad. En este caso indica 2 sólidos; la geometría del vehículo y el enclosure. Listo esto, cerramos la ventana de trabajo, y veremos un Check afirmativo en "Geometry". Ahora se ingresa en "Mesh" para realizar el mallado de los sólidos. En el árbol de trabajo que se muestra en figura ??, se hace click derecho en Mesh y luego en "Generate".

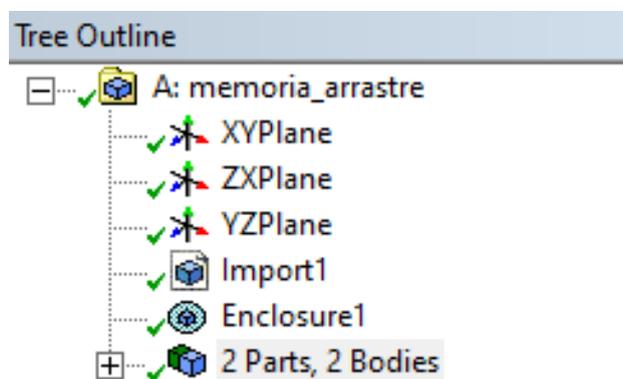


Fig. D.3: árbol de trabajo de Design Modeler.

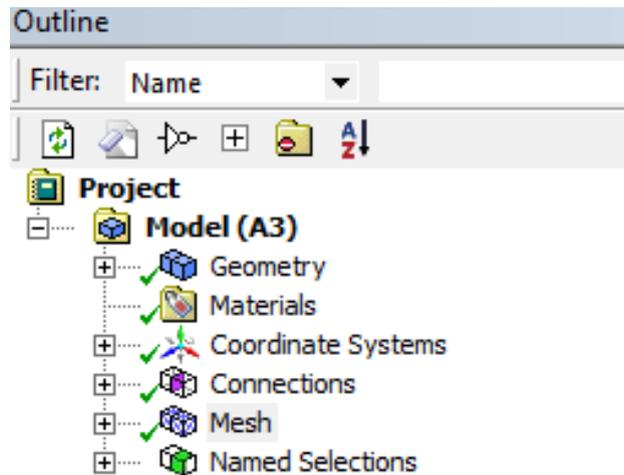


Fig. D.4: árbol de trabajo de entorno Mesh.

Luego podremos ver el sólido como se muestra en la figura D.5 donde se le ha aplicado un mallado o Mesh.

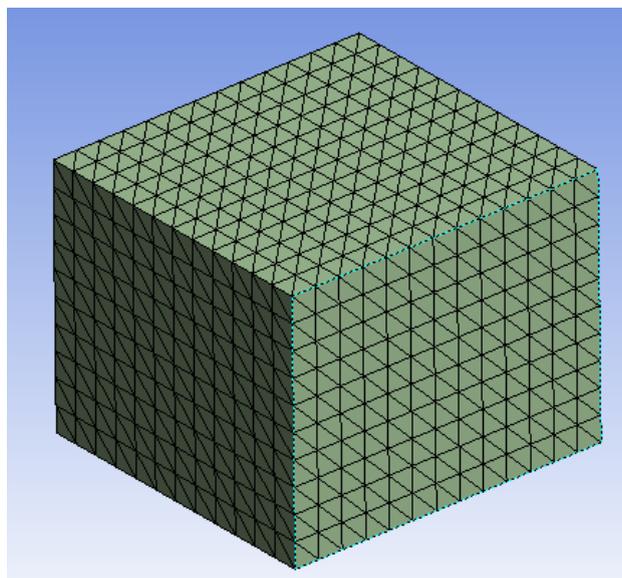


Fig. D.5: vista de sólidos con generación de Mesh aplicada.

En la figura D.6, en el árbol de trabajo, se debe hacer click derecho en Mesh y insertar un "Método", estos métodos serán 2; uno para el sólido del vehículo, y otro para el enclosure. El método que se elige para el modelo del vehículo corresponde a "Hex dominant method" para el enclosure "Automatic Method". En cada método se configurará el tamaño de los elementos, dejándolos los elementos del vehículo en 1 mm y los del enclosure en 10 mm. En la figura D.7 se muestra la selección de un objeto para añadir un método.



Fig. D.6: árbol de trabajo donde se insertan métodos.

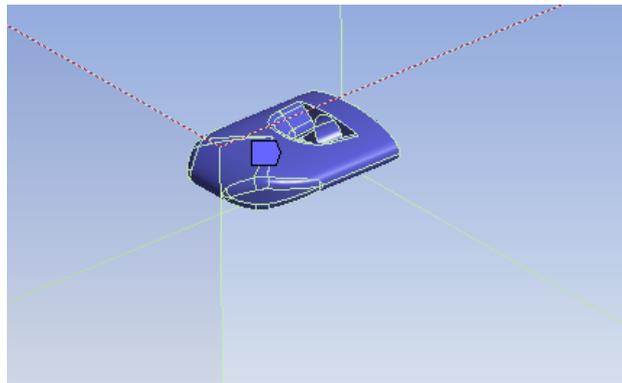


Fig. D.7: aplicación de un método a un cuerpo.

La figura D.8 muestra nuevamente el árbol de trabajo, el cual nos muestra la pestaña "Named Selections", donde se ha nombrado una o varias caras de los solidos.

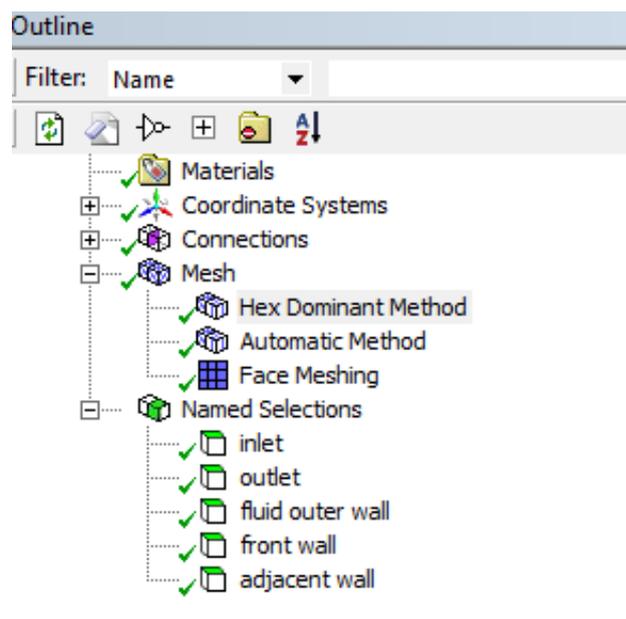


Fig. D.8: árbol de trabajo en Mesh donde se insertan Selecciones nombradas.

En la figura D.9 y D.10 se muestran las caras llamadas "inlet" y "outlet". Estas tienen por finalidad indicar por donde ingresará el fluido a simular (inlet) y por donde saldrá (outlet). Esto tendrá por objetivo simular un movimiento en yaw.

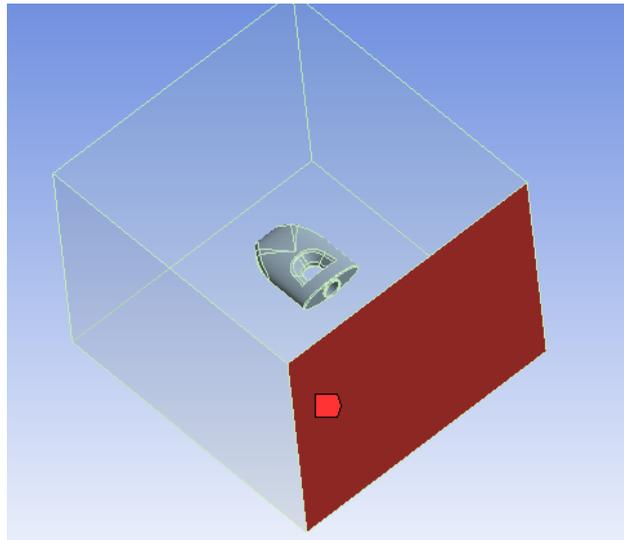


Fig. D.9: vista de Inlet.

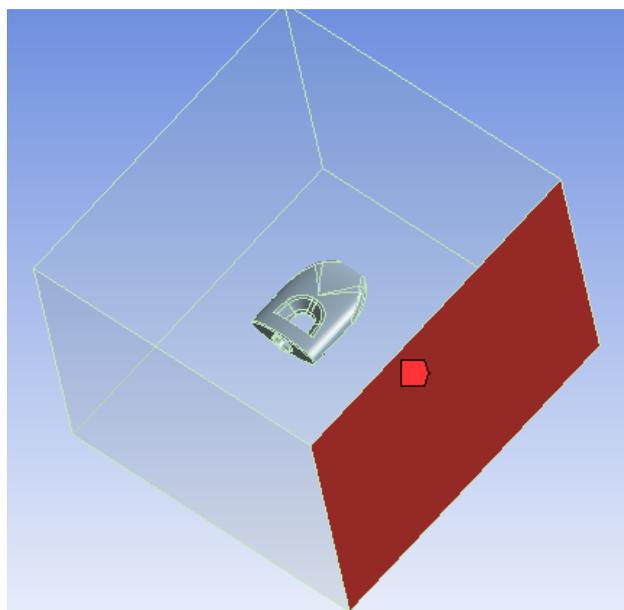


Fig. D.10: vista de Outlet.

Una vez configurado el entorno de "Mesh" se hace un "Update" haciendo click derecho sobre "Mesh". Luego se cierra esta ventana de trabajo y se ingresa a "Setup". Este parte de "Setup" tendrá por objetivo configurar la simulación, añadiendo tipos de fluidos, condiciones iniciales, variable a computar, etc. En la figura D.11 se presenta el árbol de trabajo del entorno "Setup". En este lo primero que se realiza es configurar el apartado de "Models"

cambiar la viscosidad del fluido, trabajando y seleccionando "k-epsilon (2 eqn)".

Luego se selecciona "Materials" se añade el fluido de agua con una densidad de kg/m^3 imitando agua de mar. En "Cell Zone Conditions" se configura y establece los materiales que harán contacto, sólido-fluido. Continuando, se ingresa a "Boundary Conditions" se modifica la condición inicial, haciendo click en "inlet" (ver figura D.12) y añadiendo la velocidad del fluido a simular.

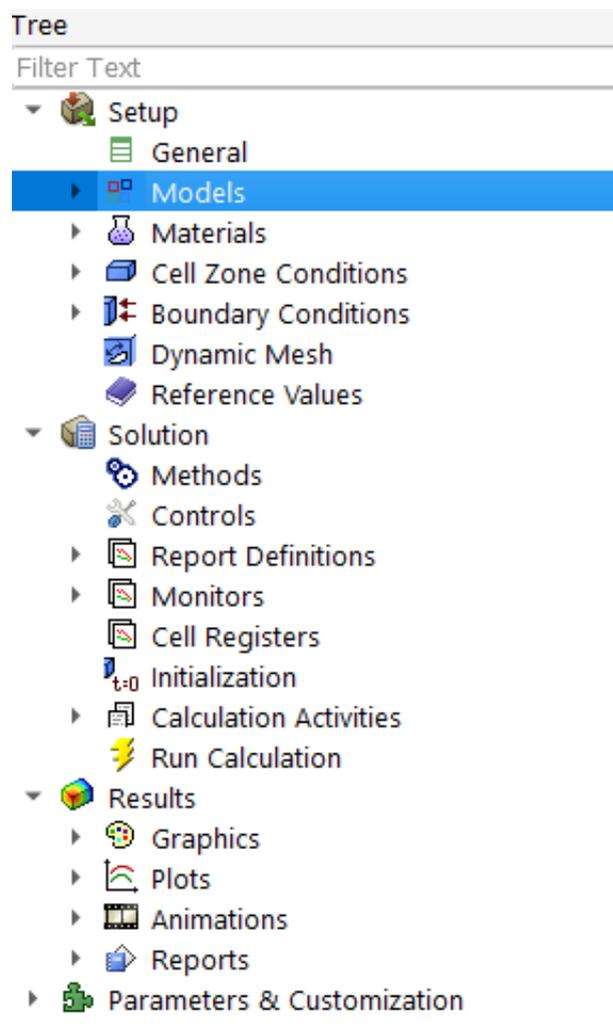


Fig. D.11: árbol de trabajo de entorno Setup.



Fig. D.12: opciones de límites de condiciones.

Luego, uno de los últimos pasos es declarar lo que se necesita calcular y computar. En este caso se busca obtener la fuerza de arrastre para yaw, por lo que se computa una fuerza en la dirección X e Y, simulando una dirección de yaw (ver figura D.13).

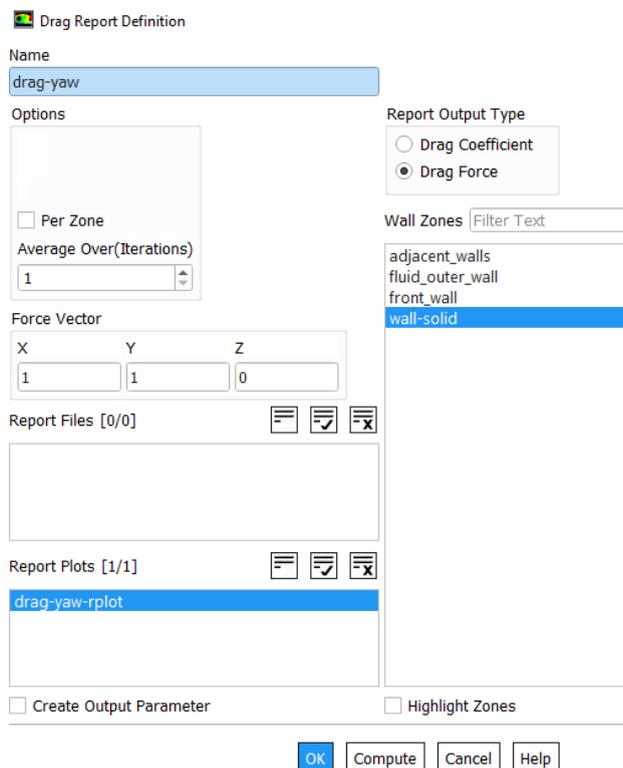


Fig. D.13: declaración de reporte de variables.

Una vez se sabe lo q se va a calcular, ingresa en "Initialization" se hace click en "Initialize".

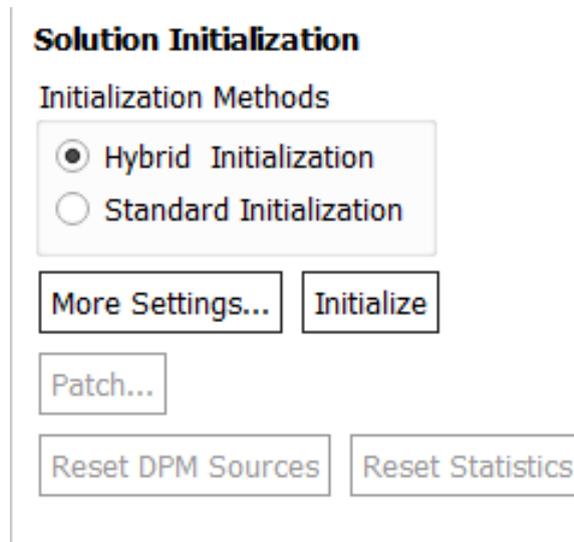


Fig. D.14: ventana de inicialización de soluciones.

Finalmente, se ingresa en "Run Calculation", se modifica la cantidad de iteraciones, en este caso se realizan 1000 iteraciones, y se hace click en "Calculate".

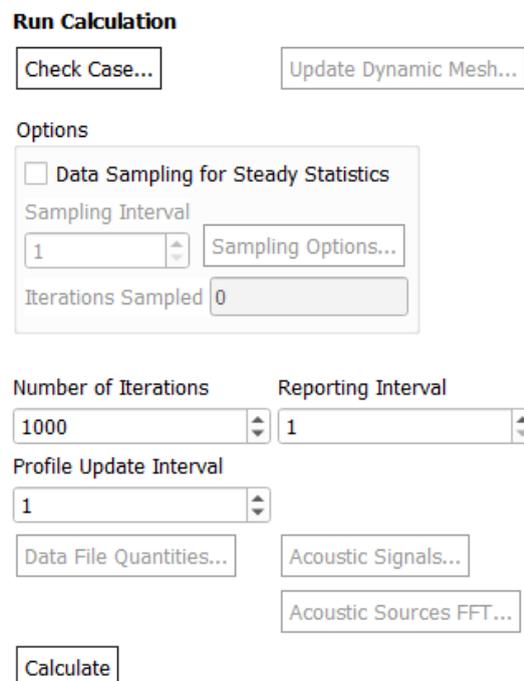


Fig. D.15: ventana comenzar el cálculo.

Al finalizar las iteraciones se obtiene un gráfico de la fuerza de arrastre en yaw como se puede ver en la figura D.16

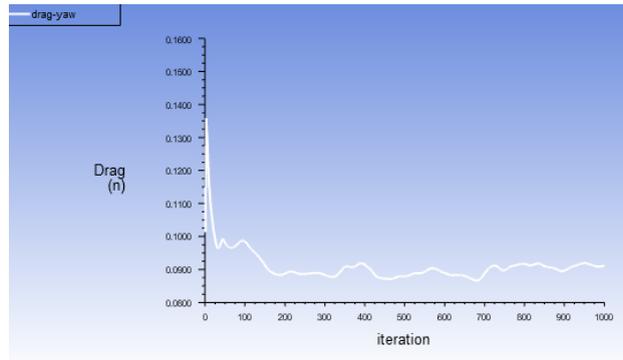


Fig. D.16: gráfico Fuerza arrastre - Iteraciones (yaw).

Como última muestra de resultado, se puede ingresar a Results.^{en} el esquema de proyecto y aquí visualizar los resultados. En la figura D.17 se muestra el resultado obtenido para yaw, donde la corriente realiza una rotación en el eje Z.

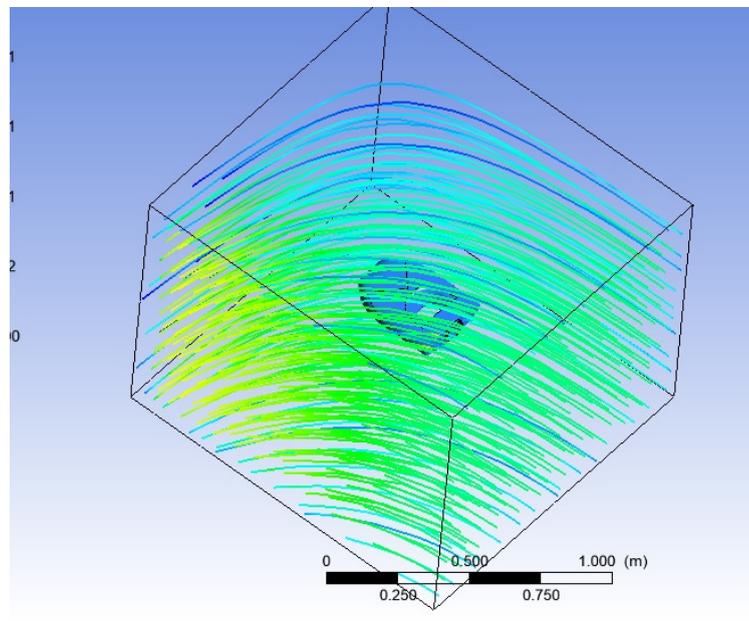


Fig. D.17: visualización de resultados obtenidos en yaw.

D.2. Gráficas de fuerza de arrastre

Lo explicado anteriormente se realiza para $X, Y, ZyYaw$, obteniendo una fuerza de arrastre para una velocidad específica. Con esos datos se confecciona la tabla D.1, la cual resume el trabajo realizado.

Tabla D.1: datos obtenidos de simulaciones en ANSYS para fuerzas de arrastre.

	Para X		Para Y		Para Z		Para yaw	
	Velocidad (m/s)	D(N)	Velocidad (m/s)	D(N)	Velocidad (m/s)	D(N)	Velocidad (rad/s)	D(N)
1	0.1	0.056	0.1	0.083	0.1	0.215	0.1	0.0015
2	0.5	1.377	0.5	2.10	0.5	5.604	0.4	0.023
3	1	5.829	1	8.548	1	21.007	0.8	0.091

Con la información que se obtiene en la tabla D.1 se pueden encontrar las ecuaciones de arrastre para X, Y, Z y Yaw a través de 3 puntos conocidos:

$$D_x = 6.223 \cdot x^2 - 0.431 \cdot x + 0.0369$$

$$D_y = 8.7261 \cdot x^2 - 0.1932 \cdot x + 0.0151$$

$$D_z = 19.2594 \cdot x^2 + 1.9168 \cdot x - 0.1693$$

$$D_{yaw} = 0.1412 \cdot x^2 - 0.0008163 \cdot x + 0.000006802$$

Estas ecuaciones son ingresadas en Matlab para la obtención de los gráficos de la figura D.18

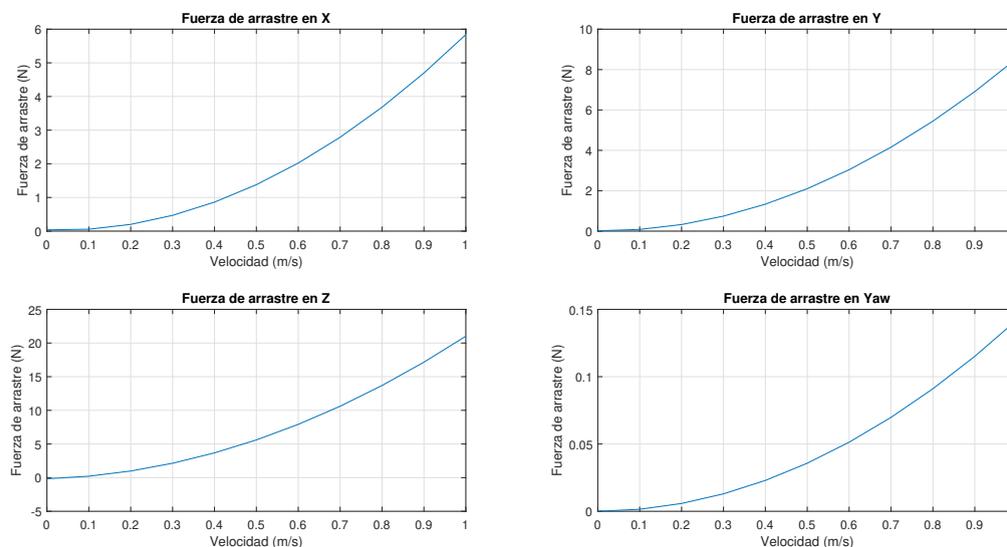


Fig. D.18: gráficas obtenidas de las fuerzas de arrastre en X, Y, Z, Yaw, para el prototipo diseñado.

A continuación, se adjunta el código de Matlab para la obtención de los gráficos.

D.3. Código para obtención de gráficas de fuerza de arrastre en Matlab

```
%vectores de velocidad (m/s)
x = 0:0.1:1;
y = 0:0.1:1;
z = 0:0.1:1;
k = 0:0.1:1;

%ecuaciones que describen el comportamiento de
%la fuerza de arrastre en X, Y, Z, Yaw
Dx = 6.233*x.^2 - 0.431*x + 0.0369;
Dy = 8.7261*x.^2 - 0.1932*x + 0.0151;
Dz = 19.2594*x.^2 + 1.9168*x - 0.1693;
Dyaw = 0.1412*x.^2 + 0.0008163*x + 0.000006802;

%Gráficas de ecuaciones
subplot(2,2,1)
plot(x,Dx)
title('Fuerza de arrastre en X')
xlabel('Velocidad (m/s)')
ylabel('Fuerza de arrastre (N)')
grid on

subplot(2,2,2)
plot(y,Dy)
title('Fuerza de arrastre en Y')
xlabel('Velocidad (m/s)')
ylabel('Fuerza de arrastre (N)')
grid on

subplot(2,2,3)
plot(z,Dz)
title('Fuerza de arrastre en Z')
xlabel('Velocidad (m/s)')
ylabel('Fuerza de arrastre (N)')
grid on

subplot(2,2,4)
plot(k,Dyaw)
title('Fuerza de arrastre en Yaw')
xlabel('Velocidad (m/s)')
ylabel('Fuerza de arrastre (N)')
grid on
```

E. Obtención de parámetros en SolidWorks

En el diseño CAD realizado en SolidWorks y ensamble de este, se pueden obtener parámetros físicos como masa, centros de masa, volumen del ensamble y momentos de inercia.

Para esto, se debe ir al comando que se encuentra en la pestaña "Calcular" luego presionar en "Propiedades Físicas". Luego, se desprenderá una pestaña en donde se muestra el cálculo de estos parámetros y opciones de configuración entre otras cosas. En la figura E.1 se presentan la ventana de datos obtenidos en SolidWorks.

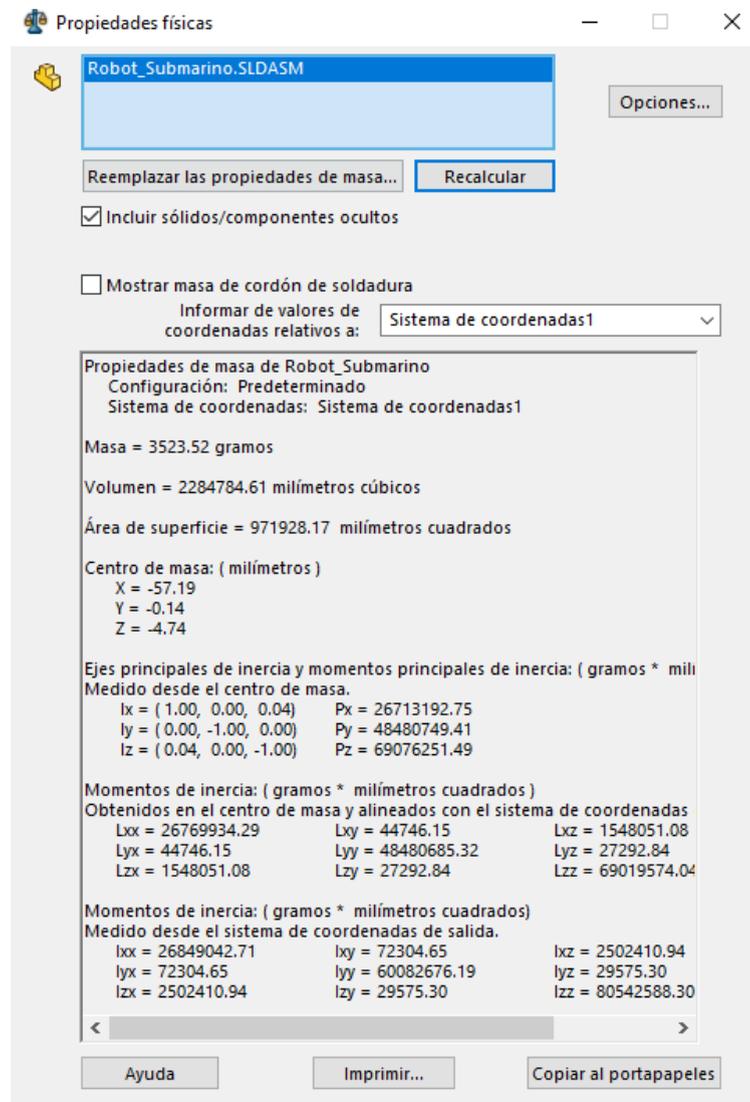


Fig. E.1: variables obtenidas del ensamble en SolidWorks.

F. Simulación de control

Se presentan los esquemas de control tanto de bloque como de código que se implementó para la obtención de resultados en el control de posición.

F.1. Bloques de control en Simulink

Se presenta el esquema de control (ver figura F.1) realizado en Simulink, en donde se pueden ver un control para X-Y y otro para Z. Estos pueden funcionar en paralelo.

Los bloques de funciones más relevantes son los que tienen por nombre; ".ángulo", "Velocidad de referencia", "Velocidad actual", "T2".

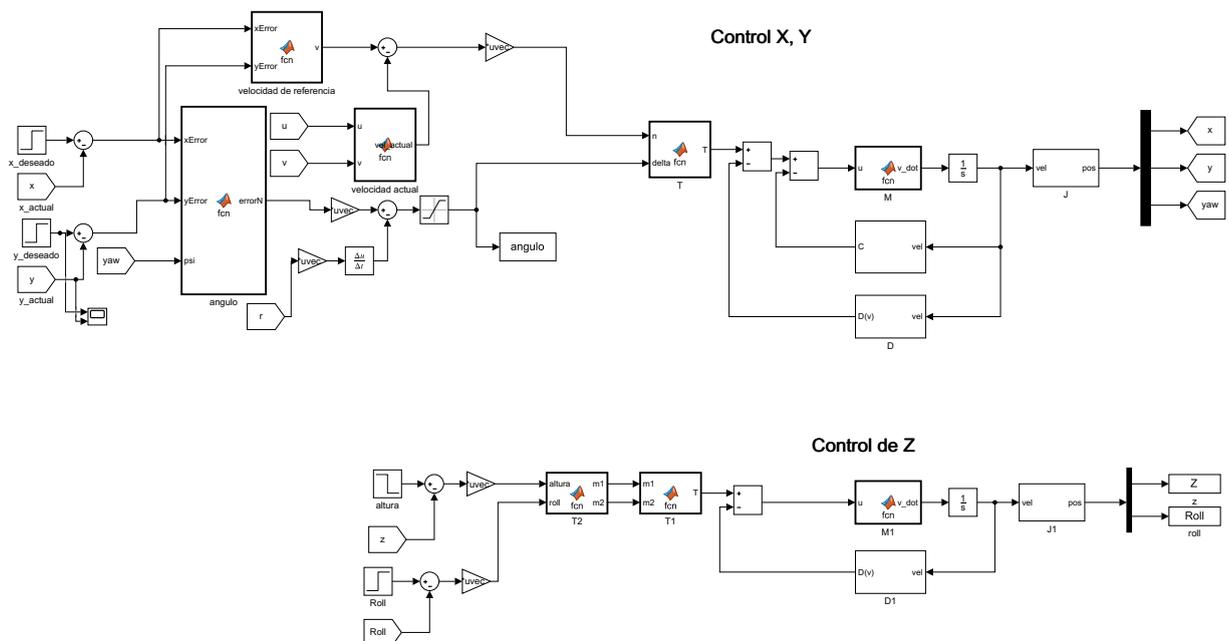


Fig. F.1: esquema de control de posición en Simulink.

En la figura F.2 se muestra el código que se encuentra dentro del bloque ".ángulo", el cual se utiliza para obtener el ángulo entre el vector objetivo y el actual del vehículo, utilizando los errores de X e Y, además de la orientación de actual de yaw. En síntesis, este bloque se utiliza para obtener y controlar posteriormente el ángulo.

```

function errorN = fcn(xError, yError, psi)

theta = atan2(yError, xError);

if theta < 0
    theta = theta + 2*pi ;
end

errorN = theta - psi;

if pi <= errorN && errorN < 2*pi
    errorN = errorN - 2*pi ;
elseif -2*pi < errorN && errorN < -pi
    errorN = errorN + 2*pi ;
end

```

Fig. F.2: bloque de cálculo de ángulo.

Para controlar la velocidad de avance, se utilizan los errores de X e Y, así se puede obtener una velocidad de referencia para alcanzar el punto objetivo. En la figura F.3 se hace uso de los datos mencionados obteniendo un vector velocidad de referencia. Por otra parte, este vector se compara con un vector actual de velocidad, el cual se obtiene con las velocidades lineales u y v del vehículo. Con estos dos vectores se hace una diferencia, encontrando un error de velocidad, el cual se utiliza como entrada para controlar la velocidad de avance. En la figura F.4 se muestra el código para la obtención del vector actual de velocidad.

```

function v = fcn(xError,yError)

v = sign(cos(atan2(yError,xError)))*sqrt((xError)^2+(yError)^2);

```

Fig. F.3: bloque de cálculo velocidad de referencia.

```

function vel_actual = fcn(u,v)

vel_actual = sign(cos(atan2(v,u)))*sqrt(u^2+v^2);

```

Fig. F.4: bloque de cálculo velocidad actual.

En cuanto al esquema de control para Z, el bloque más relevante es el de ponderación de error, el cual servirá como señal de entrada al sistema y posteriormente el avance en la dirección Z. En la figura F.5 se presenta el código que se utiliza, siendo este simple y utilizado en control de vuelos de dron. Este consiste en obtener una ponderación para cada motor orientado en Z, esta ponderación la corregirá siempre el control. Al estar roll siempre seteado en 0 se vuelve una tarea más simple para el control en este caso, pues solo debe controlar Z.

```

function [m1,m2] = fcn(altura, roll)

m1 = altura + roll;
m2 = altura - roll;

```

Fig. F.5: bloque de ponderación señal de motores.

F.2. Código de seguimiento de referencias

```
%%Inicio
clc ; clear ; close all ;

%%Especificaciones veh culo
m = 3.01358;

% si deajo los coeficientes de masa a adida
% en 0 el sistema funciona mejor.
Xp = 1.9404;
Yp = 6.0572;
Np = 0.0321;
Izz = 0.06983012;
Xu = 2.3015;
Xuu = 8.2845;
Yv = 8.0149;
Yvv = 23.689;
Nr = 0.0048;
Nrr = 0.0089;
kp = 25;
kd = 1;
kp2 = 1000; % con 200 trabajaba con menos error pero se demora demasiado
ki = 0.5;

%%Condiciones iniciales
% Posici n en el sistema de cordenada inercial
xEarth = 0 ;
yEarth = 0 ;
psi = 0 ;

% Velocidad en el sistema de coordenadas local
uBody = 0 ;
vBody = 0 ;

r = 0 ; % velocidad angular es la misma en ambos sistemas
v = [uBody;vBody;r];

% Velocidad en el sistema de coordenadas inercial
% Componente de la direccion X inercial en uBody
uEarthX = uBody * cos(psi) ;
% Componente de la direccion y inercial en uBody
uEarthY = uBody * sin(psi) ;
% Componente de la direccion X inercial en vBody
```

```

vEarthX = - vBody * sin(psi) ;
%Componente de la direccion y inercial en vBody
vEarthY = vBody * cos(psi) ;

Componente de la direcci n x inercial de V (velocidad cuerpo)
VEarthX = uEarthX + vEarthX ;%Componente de la direccion x inercial de V (v
VEarthY = uEarthY + vEarthY ; %Componente de la direccion y inercial de V (v

%%Punto de trayectoria en el sistema de coordenada inercial
waypoint = [[3, 3];
            [8,3 ];
            [8,12];
            [3,12];
            [3,3]];

%%Condiciones para la simulaci n
time = 0 ;          %Tiempo inicial
dt = 0.1 ;         %Intervalo de paso de tiempo
reach = 0.05 ;     % criterio de investigaci n
xEarthHistory = [] ; % Contenedor para dibujar la trayectoria
yEarthHistory = [] ; % Contenedor para dibujar la trayectoria

% Matriz M y tau / matriz de masas y entradas
M=[m+Xp 0 0;
   0 m+Yp 0;
   0 0 Izz+Np];

Ml = M^-1; % inversa de matriz

tau_M=[9.566e-4 0;
       0 0.25;
       0 0.0569];

% Se ejecuta hasta que el vehiculo llega a destino
for waypointIndex = 1:length(waypoint)
    isReached = false ;
    % bool para comprobar que el barco lleg a destino

    % Investiga los "waypoints" uno por uno
    singleWaypoint = waypoint(waypointIndex, :) ;

    xWaypoint = singleWaypoint(1) ; % deshacer

```

```

yWaypoint = singleWaypoint(2) ;           % deshacer

while ~isReached
    %%Error de ángulo de dirección de avance
    errorX = xWaypoint - xEarth ;
    % error de x entre el objetivo y el barco

    errorY = yWaypoint - yEarth ;
    % error de y entre el objetivo y el barco

    theta = atan2(errorY, errorX) ;
    % Ángulo de derivación del "waypoint" en el
    % sistema de coordenadas inerciales.

    if theta < 0
        % compensar el rango de representación
        % de ángulos de [-pi, pi] a [0-2pi]

        theta = theta + 2*pi ;
    end

    errorN = theta - psi ;
    % error de y entre el objetivo y el vehículo

    if pi <= errorN && errorN < 2*pi
        % compensar el rango de representación
        % de ángulos de [-pi, pi] a [0-2pi].

        errorN = errorN - 2*pi ;
    elseif -2*pi < errorN && errorN < -pi
        errorN = errorN + 2*pi ;
    end

    thetaB = atan2(vBody, uBody);
    if pi <= thetaB && thetaB < 2*pi
        thetaB = thetaB - 2*pi;
    elseif -2*pi < thetaB && thetaB < -pi
        thetaB = thetaB + 2*pi;
    end

    Vref = sign(cos(errorN))*sqrt((errorX)^2+(errorY)^2);
    Vactual = sign(cos(thetaB))*sqrt(uBody^2+vBody^2);

    Verror = Vref - Vactual;
    u1 = Verror*kp2;

```

```

%%Controlador P
% entrada: error angulo, salida: fuerza de control
kp = 25 ;
Controlinput = kp * errorN ;

% Controlar la saturacion de a fuerza. fuerza control
% esta limitada cuando se excede este valor.

if Controlinput > 0.785398
    Controlinput = 0.785398;
elseif Controlinput < -0.785398
    Controlinput = -0.785398;
else
    Controlinput = Controlinput;
end

u2 = Controlinput;
%%Plataformas
% entrada: fuerza control, output: posicion de barcos
u = [u1;u2];
tau = tau_M*u;

% Matriz de fuerzas centr petas
C = [0 -0.8*r 0.2076*vBody;
0.8*r 0 -0.0163*uBody;
0.2076*vBody -0.0163*uBody 0];

%Matriz de fuerzas de arrastre
D = diag([Xu+XuU, Yv+YvV, Nr+Nrr])*v;

dv = (tau-D) - C*v; %aceleracion, modelo din mico
v = v + dt*M1*dv; % velocidad, modelo din mico

% Nueva velocidad del barco

uBody = v(1) ;
vBody = v(2) ;
r = v(3) ;

% Nueva posicion de vehiculo a partir de la
% nueva velocidad de este

psi = psi + r * dt ;
psi = mod(psi, 2*pi) ;
% compensar el rango de representacion de
% angulos de [-pi, pi] a [0-2pi].

```

```

%Transformacion de sistema de coordenada desde loca a inercial

% Componente de la direcci n X inercial de uBody
uEarthX = uBody * cos(psi) ;
% Componente de la direcci n y inercial de uBody
uEarthY = uBody * sin(psi) ;
% Componente de la direcci n X inercial de vBody
vEarthX = - vBody * sin(psi) ;
% Componente de la direcci n y inercial de vBody
vEarthY = vBody * cos(psi) ;

% Componente de direcci n x de V (velocidad veh culo)
VEarthX = uEarthX + vEarthX ;
% Componente de direcci n 2 de V (velocidad veh culo)
VEarthY = uEarthY + vEarthY ;

xEarth = xEarth + VEarthX * dt ;
yEarth = yEarth + VEarthY * dt ;

%%Visualizaci n
% Generar matriz de trayectoria
xEarthHistory(end+1) = xEarth ;
yEarthHistory(end+1) = yEarth ;

shipPositionFig = figure(1) ;
figure(shipPositionFig) ;

% Dibujo
plot(yEarthHistory , xEarthHistory , '.b') ; % trayectoria
hold on ;
plot(waypoint(:, 2), waypoint(:, 1), 'vr') ; % waypoints
quiver(yEarth , xEarth , VEarthY, VEarthX, 'm') ; % vector velocidad
quiver(yEarth , xEarth , errorY , errorX , 'c') ;
% vector desde punto deseado a el
hold off ;

% configuraci n im gen
title('Seguimiento de puntos en plano X-Y') ;
xlabel('y(m)') ;
ylabel('x(m)') ;
grid on ;
pbaspect([1 1 1])

```

```
axis equal

%%Se verifica si alcanz el punto de referencia
errorDistance = sqrt(errorX^2 + errorY^2) ;
if errorDistance < reach
    isReached = true ;
end

%%Registro del tiempo
time = time + dt ;

%%Imprime el estado actual
fprintf('tiempo: %.2f seg, Error distancia: %.2f m\n',
time, errorDistance ) ;
end
end
disp('Destino alcanzado ')
```