

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DISEÑO DE VEHÍCULO DE SUPERFICIE NO TRIPULADO PARA MONITOREO  
DE CETÁCEOS, ZOOPLANCTON Y VARIABLES OCEANOGRÁFICAS EN  
ZONAS COSTERAS DEL NORTE PERUANO**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Mecatrónica**

**AUTORA:**

Fabiola Beatriz Díaz Salinas

**ASESOR:**

Ing. Diego Quiroz Velásquez

Lima, Setiembre 2025

## Informe de Similitud

Yo, Diego Eduardo Quiroz Velasquez, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado

DISEÑO DE VEHÍCULO DE SUPERFICIE NO TRIPULADO PARA MONITOREO DE CETÁCEOS, ZOOPLANCTON Y VARIABLES OCEANOGRÁFICAS EN ZONAS COSTERAS DEL NORTE PERUANO

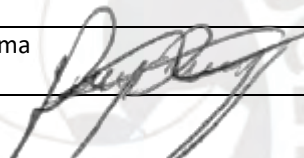
del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as)

FABIOLA BEATRIZ DÍAZ SALINAS,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 10%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 09/09/2025.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 10 de Setiembre 2025

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Quiroz Velasquez, Diego Eduardo</u>	
DNI:45872538	Firma 
ORCID: 0000-0001-8505-3045	



*Dedico esta tesis a mi mamá, quien es mi guía incondicional  
y me ha enseñado a luchar por mis sueños; y a mis hermanos  
por acompañarme cálidamente en este arduo camino.*

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer a mi mamá, Edith Salinas, por entregar su vida y sacrificarse con el objetivo de que pueda crecer en un entorno donde solo me centro en alcanzar mis metas personales aún en las peores situaciones. Así, he podido aprender en las diferentes etapas de mi vida y tener acceso a una educación continua que me ha brindado oportunidades y herramientas que me sirven en mi día a día. También, un agradecimiento especial a mi hermana Sophia, por compartirme en una de nuestras conversaciones su preocupación por la bioacústica de las especies marinas en nuestro gran ecosistema marino, con lo cual pudimos voltear a cuestionarnos cómo desconocemos y dejamos de lado realidades tan cercanas de seres vivos indefensos a la actividad humana. Además, un enorme agradecimiento a mi hermano Nicolás por labrar mi camino en la universidad y siempre apoyarme en cualquier duda o preocupación que atravesaba. Por otro lado, un agradecimiento a mi alma mater y todos mis profesores que contribuyeron a transmitirme el anhelo de siempre aprender y emplearlo para las necesidades de nuestro entorno. Así, comprendí la finalidad de emplear mi vocación para ayudar y generar cambios. Finalmente, un gran agradecimiento a mi asesor Diego Quiroz por su apoyo constante y su disposición para guiarme en este trabajo de tesis incluso antes y después de los cursos regulares del proyecto de fin de carrera.

## RESUMEN

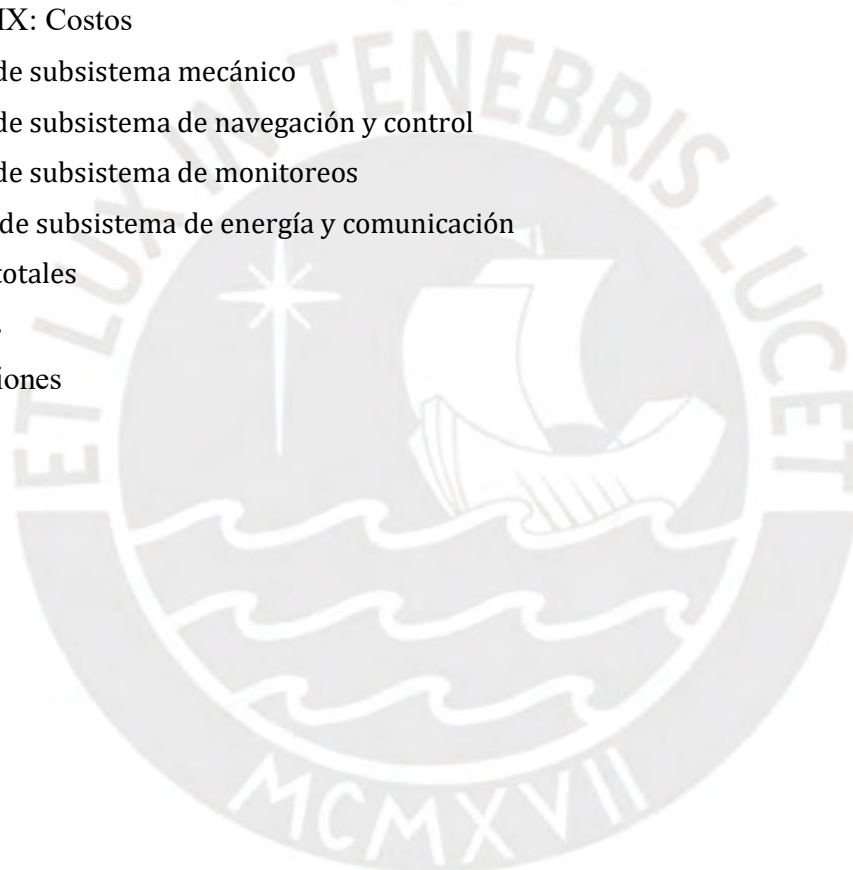
El presente trabajo consistió en el diseño de un vehículo de superficie no tripulado, capaz de detectar cetáceos —específicamente *Balaenoptera musculus* (ballena azul) y *Megaptera novaeangliae* (ballena jorobada)—, y mapear la distribución en espacio y tiempo del zooplancton. Paralelamente, se diseñó para la adquisición continua de cuatro variables oceanográficas esenciales: pH, oxígeno disuelto, temperatura y conductividad. El objetivo principal que motivó este diseño es la necesidad de mitigar la contaminación acústica a través de la localización de cetáceos en la zona marítima del norte del Perú, y así, poder realizar regulaciones y cese temporal de actividades antropogénicas no afectar los mamíferos marinos. Adicionalmente, se incluyó la capacidad de obtener la distribución del zooplancton en las zonas de alta actividad de hidrocarburos y de otras actividades antropogénicas para determinar el grado del impacto acústico acumulado en el ecosistema. Debido a la duración extendida de su misión —de julio a octubre, coincidente con la temporada migratoria de los cetáceos—, el vehículo posee navegación autónoma, y una propulsión basada en energía renovable de olas. Así mismo, una energización que utiliza la energía solar y para evadir obstáculos dinámicos se implementó propulsores auxiliares.

De esta manera, el trabajo comprendió una investigación de las características del entorno, antecedentes comerciales y estado de tecnologías, seguido del diseño conceptual. Luego, se desarrolló el diseño del subsistema mecánico; de navegación y control; de monitoreo de cetáceos, zooplancton y variables oceanográficas; y de energía y comunicación. Finalmente, como resultado se concluyó que se logra diseñar un vehículo de superficie no tripulado autónomo que cumple eficazmente el monitoreo de cetáceos, zooplancton y variables esenciales oceanográficas considerando una aplicación prolongada en la zona norte entre el Sur de Piura y Norte de Lambayeque.

INTRODUCCION	1
1. CAPÍTULO I: Presentación de problemática	2
1.1 Descripción general	2
1.2 Propuesta de solución	4
1.3 Alcance	5
1.4 Objetivos	5
1.5 Metodología	6
CAPÍTULO II: Estado del arte	8
2.1 Vehículos no tripulados propulsados por olas o aire	8
2.2 Sistema de monitoreo de cetáceos	10
2.3 Sistema de mapeo de zooplancton	12
2.4 Monitoreo de variables oceanográficas	14
CAPÍTULO III: Diseño conceptual del vehículo de superficie no tripulado para monitoreo acústico y oceanográfico	15
3.1 Lista de requerimientos	15
3.2. Determinación de estructura de funciones	16
3.2.1 Black box	16
3.2.2 Estructura de funciones	17
3.3 Conceptos de solución	17
3.3.1 Matriz morfológica	17
3.4 Evaluación de criterios técnico-económicos	20
3.5 Concepto de solución óptimo	21
3.5.1 Modelado 3D	21
3.5.2 Diagrama de operaciones	24
3.5.3 Diagrama electrónico	25
CAPÍTULO IV: Diseño del subsistema mecánico del vehículo de superficie	26
4.1 Embarcación	26
4.1.1 Selección de material	26
4.1.2 Cálculos de forma y disposición de cascos	27
4.1.3 Análisis de estabilidad del trimaran	32
4.1.4 Estructura de soporte	33
4.1.5 Manijas de izaje	35
4.2 Timón	36
4.2.1 Dimensionamiento del timón	36
4.2.2 Comprobación de maniobrabilidad	38
4.2.3 Selección de servomotor	39
4.3 Mecanismo de propulsión	41

4.3.1 Cálculo de fuerza de resistencia	41
4.3.2 Selección de material y perfil de hidroala	44
4.3.3 Cálculos de subunidad sumergida	46
4.3.4 Selección de propulsión auxiliar	51
4.4 Estructura de soporte para paneles	53
4.4.1 Cálculos de estructura	53
4.4.2 Análisis de flexión	54
<b>CAPÍTULO V: Diseño del subsistema de navegación del vehículo autónomo</b>	<b>56</b>
5.1 Diagrama de bloques	56
5.2 Componentes del subsistema de navegación y control	56
5.3 Arquitectura del hardware	61
5.4 Planificación global	62
5.5 Planificación local	65
5.5.1 Planificación de movimientos sin evasión de obstáculos	65
5.5.2 Planificación de movimiento con evasión de obstáculos	70
5.5.3 Simulación de ruta del vehículo	73
5.6 Control de movimiento	76
5.6.1 Modelo dinámico del vehículo de superficie	76
5.6.2 Controlador de orientación para seguimiento de ruta	78
5.6.3 Controlador de movimiento para evasión de obstáculos	81
<b>CAPÍTULO VI: Diseño del subsistema de monitoreo</b>	<b>84</b>
6.1 Monitoreo de cetáceos	84
6.1.1 Cálculo de arreglo horizontal de hidrófonos	84
6.1.2 Diseño del subsistema de monitoreo acústico	87
6.1.3 Etapa de preprocesamiento	100
6.1.4 Detección de cetáceos mediante RESNET-50	101
6.2 Monitoreo de zooplancton	104
6.2.1 Componentes del mapeo de distribución	104
6.2.2 Procesamiento de datos de ecosonda	109
6.3. Monitoreo de variables oceanográficas	111
6.3.1 Componentes para monitoreo de temperatura, pH, oxígeno disuelto y salinidad	111
6.4 Arquitectura de hardware	115
<b>CAPÍTULO VII: Diseño del subsistema de energía, comunicación e interfaz</b>	<b>116</b>
7.1. Subsistema de energía	116
7.1.1 Cálculos del arreglo de paneles	117
7.1.2 Elección del sistema de recarga de baterías	119
7.2. Subsistema de comunicación	122

7.2.1 Comunicación satelital	122
7.2.2 Comunicación remota con interfaz	122
7.3 Arquitectura del hardware	125
7.4 Interfaz	126
CAPÍTULO VIII: Integración de subsistemas	128
8.1 Modelado 3D del sistema integrado	128
8.2 Arquitectura del hardware integrado	129
8.3 Diagramas de flujo del sistema integrado	129
8.4 Lista de planos mecánicos del sistema integrado	130
8.5 Lista de planos electrónicos del sistema integrado	131
CAPÍTULO IX: Costos	132
9.1 Costos de subsistema mecánico	132
9.2 Costos de subsistema de navegación y control	134
9.3 Costos de subsistema de monitoreos	135
9.4. Costos de subsistema de energía y comunicación	137
9.5 Costos totales	138
Conclusiones	139
Recomendaciones	140
Bibliografía	141



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Comparación de vehículos no tripulados propulsados por aire .....	9
Tabla 2.2 Comparación de vehículos planeadores y de superficie .....	14
Tabla 3.1 Cuadro comparativo de conceptos de solución.....	19
Tabla 4.1 Tabla de características físicas y mecánicas de la fibra de vidrio tipo E.....	26
Tabla 4.2 Propiedades ambientales de la fibra de vidrio tipo E.....	27
Tabla 4.3 Dimensiones del casco central.....	28
Tabla 4.4 Dimensiones del casco lateral.....	30
Tabla 4.5 Dimensiones de monocasco equivalente .....	31
Tabla 4.6 Tabla de valores IMO a evaluar.....	32
Tabla 4.7 Tabla de resultados de curva.....	33
Tabla 4.8 Dimensiones de timón .....	38
Tabla 4.9. Características hidrostáticas de casco principal.....	42
Tabla 4.10 Características de casco lateral .....	43
Tabla 5.1 Luz de navegación .....	58
Tabla 5.2 Tabla de obstáculos.....	73
Tabla 6.1 Tabla de rango de frecuencias de emisor de interés .....	84
Tabla 6.2 Parámetros de arreglo .....	86
Tabla 6.3 Propiedades de los componentes del arreglo .....	94
Tabla 6.4 Resultados de entrenamiento por partición (fold).....	104
Tabla 6.5 Característica de filtro de ruido .....	107
Tabla 7.1 Formato de datos para detección de cetáceos .....	122
Tabla 7.2 Formato de datos para posición y estado de vehículo .....	122
Tabla 8.1 Listado de planos mecánicos .....	130
Tabla 9.1 Fabricación de casco principal.....	132
Tabla 9.2 Fabricación de cascos laterales .....	133
Tabla 9.3 Costos del subsistema mecánico.....	133
Tabla 9.4 Costos del subsistema de navegación y control.....	135
Tabla 9.5 Costos del subsistema de monitoreos de cetáceos .....	135
Tabla 9.6 Costos del subsistema de monitoreo de zooplancton.....	136
Tabla 9.7 Costos del subsistema de monitoreos de variables oceanográficas .....	136
Tabla 9.8 Costos del subsistema de monitoreos en procesadores.....	137
Tabla 9.9 Costos del subsistema de energía y comunicación .....	137
Tabla 9.10 Costos del subsistema de comunicación.....	138
Tabla 9.11 Costos totales .....	138

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de distribución espacial del hábitat idóneo para el grupo madre con cría	2
Figura 1.2 Avistamiento de Mamíferos Marinos en el Lote Z-46	3
Figura 1.3 Mapa de la zona interesada de trabajo Piura-Lambayeque-La libertad	4
Figura 2.1 Electrónica de DMON	10
Figura 2.2 Espectrograma de ruido en Saildrone	11
Figura 2.3 (a) Arreglo horizontal de hidrófonos y (b) espectrograma de grabación con un solo hidrófono (superior) y con el arreglo horizontal (inferior)	11
Figura 2.4 Transformación logarítmica a) y PCEN en b)	12
Figura 2.5. Mapeo de zooplancton con ecosondas en sailbuoy y wave glider en a) y espectrograma con interferencia de wave glider b)	13
Figura 3.1 Caja negra del sistema	17
Figura 3.2 Estructura de funciones integrada	18
Figura 3.3 Gráfico de dispersión	20
Figura 3.4 Modelado del proyecto preliminar	21
Figura 3.5 Vista inferior del modelado	22
Figura 3.6 Vista posterior del modelado	23
Figura 3.7 Vista acercada de alas pequeñas en movimiento ascendente de la ola (a) y en movimiento descendente de la ola (b)	23
Figura 3.8 Vista alejada de subunidad sumergida	23
Figura 3.9 Diagrama de operaciones	24
Figura 3.10 Diagrama de sistema electrónico	25
Figura 4.1 Primera etapa de diseño de trimaran	28
Figura 4.2 Gráfico de características principales de un casco	28
Figura 4.3 Curvas de diseño de casco principal y lateral (a) y estructura en Rhinoceros (b)	29
Figura 4.4 Modelado de casco principal en <i>Rhinoceros</i>	29
Figura 4.5 Modelado del casco lateral	30
Figura 4.6 Modelado de trimaran	31
Figura 4.7 Modelado del trimaran, parte posterior.	31
Figura 4.8 Teoría de análisis de estabilidad	32
Figura 4.9 Diagrama de estabilidad del trimarán	33
Figura 4.10 Modelo de unión de cascos con vigas e insertos	34
Figura 4.11 Acercamiento a unión atornillada de vigas e insertos	34
Figura 4.12 Unión final de cascos con vigas y encima superficie de PVC	34
Figura. 4.13 Placa de ojo oblonga y tornillo cabeza avellanada (APM HEXSEAL)	35

Figura 4.14 Tuerca remachable	35
Figura 4.15 Sección de unión en modelado 3D	35
Figura 4.16 Esquema de recomendación de colocación timón	36
Figura 4.17 Perfil de ala	37
Figura 4.18 Modelado de paleta	37
Figura 4.19 Diagrama de fuerzas y momentos de timón	38
Figura 4.20 Driver de servomotor	40
Figura 4.21 Diagrama de acoples	40
Figura 4.22 Modelado de apoyo inferior	40
Figura 4.23 Sección de modelado de soporte superior acoplado	41
Figura 4.24 Sección de soporte inferior acoplado	41
Figura 4.25 DCL del trimaran	41
Figura 4.26 Fuerza de resistencia en kgf	43
Figura 4.27 Diagrama del movimiento de hidroala en el tiempo	44
Figura 4.28 Gráfico de propulsión frente a inclinación de hidroala	44
Figura 4.29 Modelado de hidroala	45
Figura 4.30 Coeficiente de propulsión en función el número de hidroalas	45
Figura 4.31 Diagrama de coeficiente de propulsión según constante de resorte	46
Figura 4.32 Resorte de extensión 1 in	46
Figura 4.33 Velocidad alcanzado según características de las olas	46
Figura 4.34 Diagrama de fuerza de hidroala	47
Figura 4.35 Estructura de Mesh en Ansys Fluent	48
Figura 4.36 Coeficiente $C_d$	48
Figura 4.37 Coeficiente $C_l$	48
Figura 4.38 Gráfico de Fuerza en $x$ vs tiempo	49
Figura 4.39 Modelado de hidroala	49
Figura 4.40 Modelado de Marco de subunidad sumergida	49
Figura 4.41 Resorte entre eje en ranura y un eje soporte (izquierda) y vista superior de subunidad (derecha)	50
Figura 4.42 Vista isométrica de subunidad sumergida	50
Figura 4.43 Modelado final de subunidad sumergida con estrobos	50
Figura 4.44 O-ring seleccionado	51
Figura 4.45 Modelado de placa para unión	51
Figura 4.46 Placas O blong en casco principal	51
Figura 4.47 Propulsor W30	52

Figura 4.48 Bosquejo de propulsor	52
Figura 4.49 Acople de propulsor a casco lateral	52
Figura 4.50 Vista de sección	53
Figura 4.51 Vista del ensamble en casco lateral	53
Figura 4.52 Perfil de estructura	53
Figura 4.53 Modelado de estructura de paneles solares	54
Figura 4.54 Estructura de paneles sobre cascos	54
Figura 4.55 Simulación de esfuerzo normal para vigas longitudinal de estructura	55
Figura 4.56 Simulación de esfuerzos en eje vertical para columnas de estructura	55
Figura 5.1 Diagrama de navegación autónoma	56
Figura 5.2 Diagrama de flujo de datos del radar	57
Figura 5.3 Cámara Multisense S30	57
Figura 5.4 GPS compass Vector V133	57
Figura 5.5 Sensor Orientus	58
Figura 5.6 Luz de navegación	58
Figura 5.7 Luz de navegación	58
Figura 5.8 JETSON ORIN	59
Figura 5.9 NUCLEO-F030R8	59
Figura 5.10 Soporte de radar y cámara estereoscópica	60
Figura 5.11 Base del soporte de radar y cámara	60
Figura 5.12 Ensamble de unión con casco principal	60
Figura 5.13 Diagrama electrónico del subsistema de navegación	61
Figura 5.14 Mapa de la zona de trabajo	62
Figura 5.15 Perímetro zona de trabajo	62
Figura 5.16 Pseudocódigo del método Probabilistic Road Map (PRM)	63
Figura 5.17 Mapa delimitado con obstáculos	63
Figura 5.18 Mapa normalizado con obstáculos	63
Figura 5.19 Mapa de nodos y uniones como resultado de PRM	64
Figura 5.20 Pseudocódigo de algoritmo A * empleando resultado de método PRM	64
Figura 5.21 Ruta final de algoritmo A*	65
Figura 5.22 Diagrama de flujo de planificación global	65
Figura 5.23 Diagrama de parámetros de LOS	66
Figura 5.24 Diagrama de flujo de LOS	67
Figura 5.25. Esquema de simulación en Simulink	68
Figura 5.26 Esquema de generación de fuerza del timón en simulación	68

Figura 5.27 Resultados de simulación de ruta	69
Figura 5.28 Cambios de velocidad angular en el tiempo	69
Figura 5.29 Posición del vehículo durante simulación	69
Figura 5.30 Definición de entorno en colisiones	70
Figura 5.31. Posible colisión en zona <i>overtaking</i> (a), <i>head-on</i> (b) y <i>crossing</i> (c)	70
Figura 5.32 Esquema de vehículo frente a obstáculo dinámico	71
Figura 5.33 Diagrama de flujo de velocity obstacle	72
Figura 5.34 Bloques en simulink para simulación de navegación integrada	73
Figura 5.35 Evasión de obstáculo, caso “head”	74
Figura 5.36 Modo de control en el tiempo de simulación	74
Figura 5.37 Evasión de caso “crossing left”	74
Figura 5.38 Activación del modo de navegación en el tiempo	75
Figura 5.39 Simulación de evasión de obstáculo en caso “cross right”	75
Figura 5.40 Modo de navegación a lo largo del tiempo de simulación	76
Figura 5.41 Simulación de vehículo antes diferentes casos de obstáculos dinámicos	76
Figura 5.42 Esquema de vehículo de superficie	77
Figura 5.43 Fórmulas de componentes no lineales	78
Figura 5.44 Respuesta de sistema a ángulo de timón	79
Figura 5.45 Diagrama de controlador con realimentación e integrador	79
Figura 5.46 Esquema de simulación en Simulink	80
Figura 5.47 Posición angular vehicular frente al ángulo deseado de 0.5 rad	81
Figura 5.48 Posición angular del timón para la respuesta deseada	81
Figura 5.49 Controlador de velocidad	82
Figura 5.50 Respuesta de velocidad lineal frente a escalón de propulsión	82
Figura 5.51 respuesta del controlador de velocidad	83
Figura 6.1 Gráfico de ángulos del patrón de haz 3D	85
Figura 6.2 Patrón de radiación del arreglo	86
Figura 6.3 Patrón de haz con ventana	87
Figura 6.4 Esquema de arreglo	87
Figura 6.5 Hidrófono de 2 cilindros acoplados en serie	88
Figura 6.6 Primera etapa de amplificación	89
Figura 6.7 Filtro pasa alta con arquitectura Sallen Key	89
Figura 6.8 Comportamiento del filtro según valor del factor de magnificación	90
Figura 6.9 Circuito de filtrado con Opamp OPA2211-EP	90
Figura 6.10 Esquema de conexiones de la generación de señal diferencial	91

Figura 6.11 Esquema del pre-amplificador para cada hidrófono	92
Figura 6.12 Pre-amplificador para cada hidrófono en EAGLE	92
Figura 6.13 Pre-amplificador para cada hidrófono en Fusion	93
Figura 6.14 ADC PCIE-1803-AE	93
Figura 6.15 Tubo Tygon	94
Figura 6.16 sección de cable para comunicación	95
Figura 6.17 Diagrama de conexiones	95
Figura 6.18 Dimensiones de conector MHDO con cabeza de 26 pines para cables 20 AWG	95
Figura 6.19 Dimensiones del acoplamiento recomendado por la empresa	96
Figura 6.20 Modelado conector MHDO	96
Figura 6.21 Anillo de tensión	96
Figura 6.22 Tapón de llenado de aceite	97
Figura 6.23 Modelado del adaptador entre conector MHDO y tubo Tygon	97
Figura 6.24 Tubería termoretractil	97
Figura 6.25 Acople Final	97
Figura 6.26. Soporte de hidrófonos	98
Figura 6.27 Cilindro Piezoeléctrico con soportes	98
Figura 6.28 Soporte de preamplificador	98
Figura 6.29 Preamplificador con soportes con tuberías	98
Figura 6.30 Unión de hidrófono y preamplificador con soportes y alambres	99
Figura 6.31 Tapón de tubería	99
Figura 6.32 Unión de cable de arreglo mediante prensaestopa espiral	99
Figura 6.33 Comparación de espectrograma normal y con PCEN para ballena jorobada	101
Figura 6.34 Comparación de espectrograma normal y con PCEN para ballena azul	101
Figura 6.35 Integración de ruido en los extractos de dataset	102
Figura 6.36 Muestras del dataset de cantos de ballena azul y jorobada	102
Figura 6.37 Diagrama de proceso de transferencia de aprendizaje	103
Figura 6.38 Gráfica de precisión del modelo en entrenamiento y validación	103
Figura 6.39 Gráfico de ancho de haz	106
Figura 6.40 Ecosonda WBT mini con el transductor de haz dividido ES333-7C	107
Figura 6.41 Anillo de sujeción (izquierda) y acoplador para encapsulamiento (derecho)	108
Figura 6.42. O-ring seleccionado	108
Figura 6.43 Agujeros roscados en encapsulamiento	108
Figura 6.44 Forma del casco para el correcto acoplamiento	109
Figura 6.45 Acople final del transductor en casco principal	109

Figura 6.46 Ecograma de investigación de krill en Antártida	111
Figura 6.47. Conector SeaChoice	111
Figura 6.48 sensor A7CTS-USB	112
Figura 6.49 Acople de aluminio para sensor CT	112
Figura 6.50 Acople de aluminio del sensor CT	112
Figura 6.51 Sensor iSAMI-pH	113
Figura 6.52 Acople de aluminio para sensor pH	113
Figura 6.53 Sensor RINKO-FT-CE	113
Figura 6.54 Acoplamiento de sensor DO	113
Figura 6.55 Xavier AGX	114
Figura 6.56 Memoria 1 TB HP	114
Figura 6.57 Diagrama electrónico del subsistema de monitoreo	115
Figura 7.1 Convertidor Orion 24 – 12 V	116
Figura 7.2 Regulador de 24 a 5V AM2643	116
Figura 7.3. Regulador PQDE6W-Q24-D15-DIN	117
Figura 7.4 Relé littelFuse	117
Figura 7.5 Radiación mensual	118
Figura 7.6 Panel solar flexible 12 V 200W	119
Figura 7.7 Canal J de aluminio	119
Figuras 7.8 Acople de policarbonato, panel y canal J	119
Figura 7.9 Modelado de estructura con paneles solares	119
Figura 7.10 Bateria LiFePo4 Victron	120
Figura 7.11 Regulador MPPT 250/85	120
Figura 7.12 Conductor unifilar Solar PV ZZ-F	121
Figura 7.13 Conductor 10 mm <sup>2</sup> , Solar PV ZZ -F	121
Figura 7.14 Fusible 25 A	122
Figura 7.15 Diagrama de comunicación Wi-Fi	123
Figura 7.16 Router RB750Gr3	123
Figura 7.17 Inyector PoE	123
Figura 7.18 Acople de soporte de antena en casco principal	124
Figura 7.19 Arquitectura del sistema de energía	125
Figura 7.18 Croquis de interfaz para comunicación satelital	126
Figura 7.19 Croquis de interfaz para control remoto	127
Figura 7.20 Croquis de interfaz para revisión de subsistema de navegación	127
Figura 8.1 Modelado integrado del sistema	128

Figura 8.2 Vista inferior de sistema integrado	128
Figura 8.3 Vistas de vehículo de superficie	129
Figura 8.4 Vista de subunidad sumergida	129
Figura 8.5 Arquitectura del sistema integrado	130



## INTRODUCCION

Actualmente, diferentes actividades antropogénicas en el ecosistema marino generan una alarmante contaminación acústica que afecta considerablemente el ecosistema biológico marino. Aquella polución se evidencia en interferencias sonoras, como superposición de rangos de frecuencias, que alteran la normal bioacústicas de cetáceos y otros mamíferos. Tal es el caso de la ballena Azul y Jorobada, dos de las especies más avistadas en la zona Norte Peruano. Mientras que prácticas de la exploración petrolera, como el empleo de cañones de aire comprimido, diezman más del 95% de un tercio de especies del zooplancton (Weilgart, 2018) esenciales para el ecosistema. Para abordar esta problemática y regularizar las actividades perjudicantes, el objetivo principal es el diseño de un vehículo de superficie autónomo no tripulado propulsado a base de olas. Este vehículo, diseñado para largas horas de operatividad, tendrá la capacidad de detectar y localizar en tiempo real a dos especies vulnerables: ballena jorobada y ballena azul. Adicionalmente, será capaz de realizar y almacenar un mapeo espacio-temporal de zooplancton, mientras mide cuatro variables oceanográficas: pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad, con el fin de monitorear que las condiciones ambientales sean óptimas para la vida marina. En los siguientes capítulos, primero se realiza una presentación de problemática con los objetivos del trabajo, para luego detallar una investigación de las características del entorno y estado del arte; seguido del diseño preliminar del concepto de solución óptimo. Finalmente, se presenta el desarrollo de los subsistemas mecánico, control, monitoreas y energía del vehículo no tripulado de superficie acompañado de un análisis de costos.

## 1. CAPÍTULO I: Presentación de problemática

En este capítulo, se introducirá la situación vulnerable de la vida marina en el ecosistema marino del norte del Perú, para luego plantear los objetivos del trabajo junto a la metodología a emplearse.

### 1.1 Descripción general

Durante las estaciones de invierno y primavera entre Cabo blanco y Máncora, se ha identificado una distribución poblacional de ballenas jorobadas cerca a la costa norte, con actividades de reproducción y crianza (Pacheco, 2019). Tal como se observa en la Figura 1.1, los grupos madre con cría, prefieren hábitats costeros con valores de temperatura entre 22 y 23 C hasta una distancia promedio de 2300 m de la orilla, en la isobata de 50 metros. Debido a que usualmente son más calmadas que el océano abierto y existe la oportunidad de alimentación, lactancia y aprendizaje de actividades conductuales (Pacheco, 2019).

Por otro lado, la ballena azul es una especie cosmopolita que puede ser residente de un lugar o migratoria. En general su temporada reproductiva ocurre durante el invierno, en la cual se acerca a la costa para alimentarse (Urcep, 2010). Además, existe evidencia de que los juveniles presentan un patrón de distribución espacio-temporal particular, al ser los últimos en irse y con presencia cercana a la costa. Tal escenario fue observado en el suroeste del Golfo de California, donde los juveniles fueron avistados alrededor de la isobata de 100 m (Mata, 2013).

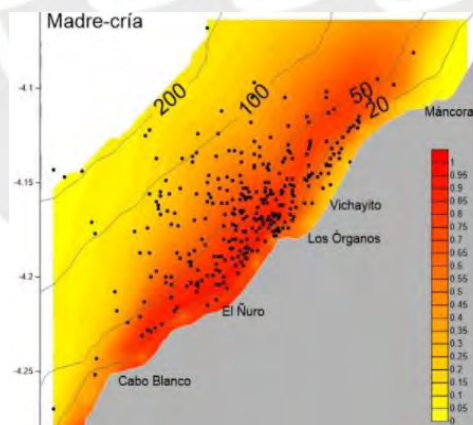


Figura 1.1 Mapa de distribución espacial del hábitat idóneo para el grupo madre con cría.  
Fuente: Pacheco 2019

Aquella distribución costera de las dos especies de ballena llega a coincidir con distintas actividades antropogénicas como la exploración de hidrocarburos. Pues, tal como se observa en la Figura 1.2, los informes medioambientales de esta industria detallan que, al sur de Lambayeque y norte de La Libertad, en la zona numerada como lote Z-46, las ballenas azules fueron más frecuentes con el 54.29% del total de avistamientos, seguidas de las ballenas

jorobadas. (SK Energy, 2009). Mientras el antiguamente denominado lote Z-35, ubicado en la costa norte de la Libertad, tuvo un registro de avistamientos constantes de ambas especies (Walsh Perú, 2011).

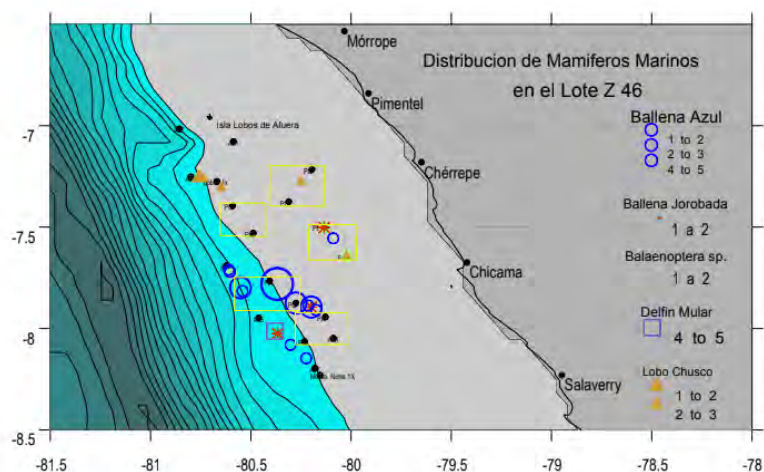


Figura 1.2 Avistamiento de Mamíferos Marinos en el Lote Z-46

Fuente: SK ENERGY 2009

Así mismo, otras fuentes de contaminación acústica producida son actividades humanas como el empleo de sonares y detonaciones militares, exploración y explotación de hidrocarburos, construcciones, tráfico marino, entre otros. Pues, el sonido emitido genera un gran daño a las especies, que según la duración, intensidad, locación y sensibilidad auditiva de la especie es posible que cause una temporal o permanente pérdida auditiva, respuesta de estrés, movilización forzada e interrupción de su alimentación, socialización, entre otros (NOAA Fisheries). Por ejemplo, en 2012 en Piura y La Libertad, 877 delfines perdieron la vida con características que, según Carlos Yaipen Llanos, fundador de la Organización de Investigación y Conservación de Animales Acuáticos (Orca Perú), presentan una estrecha relación con el ruido submarino. Debido a evidencia de hemorragias internas, destrucción del oído interno y mandibular, burbujas de aire en órganos y sistema circulatorio (La República, 2019).

También, se encuentran afectados la ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*) y la ballena azul (*Balaenoptera musculus*), ya que estos dos cetáceos mencionados frecuentan la costa del Perú durante sus trayectos de migración o movilización. Y se presenta una interferencia bioacústica, pues la ballena azul utiliza un rango de frecuencias bajo (entre 10 a 40 Hz) y la ballena jorobada desde 100 a 1000 Hz, mientras que las embarcaciones emiten ruido en el rango de 5-1000 Hz, superponiendo ambos rangos de frecuencias de los cetáceos (Veirs et al. 2016).

Sin embargo, la situación más preocupante es la exploración petrolera, debido a que utilizan instrumentos que emiten ondas a través de cañones de aire comprimido con intensidad sonora de 215-260 dB y con una frecuencia baja de 10 a 300 Hz (Ecologistas en acción, 2014). En el

caso del zooplancton, como la clase predominante Copepoda, es afectado por el impacto del sonido durante su desarrollo generando malformaciones, retrasos de crecimiento, metamorfosis y colonización junto a crecimiento lento de zooplancton. Además, se encontró que más de la mitad de todas las especies del zooplancton microscópico o pequeño, especialmente prematuro, mueren por el disparo de una sola pistola de aire sísmico y un tercio de las especies mueren en una magnitud mayor al 95% (Weilgart, 2018).

Aparte de las situaciones descritas, existe un gran tráfico marino, generando colisiones o enredos con redes que podrían conllevar a un posible deceso. Los indicadores de que aun persiste este problema en las costas del pacifico, son los eventos mortales inusuales (UME). Pues, se observa que el 37% de UMEs suceden en el océano pacifico y los más afectados son los cetáceos con un 55% de todas las especies impactadas por UMEs.

De esta forma, se puede determinar que existe la urgencia de conocer no solo la distribución de los mamíferos marinos frente a las actividades humanas, sino su relación con el ambiente de la costa peruana, mediante las mediciones espacio-temporal de parámetros de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto durante las temporadas de migración. Con el fin de implementar más regulaciones como disminución de velocidad, alejamiento de embarcaciones alrededor de 300 m de radio (Pacheco, 2019), etc. Principalmente en las zonas menos reguladas como la del sur Piura, Lambayeque y norte de la Libertad, en las cuales se han registrado avistamiento por parte de las empresas exploradoras de hidrocarburos, resumido en la Figura 1.3.

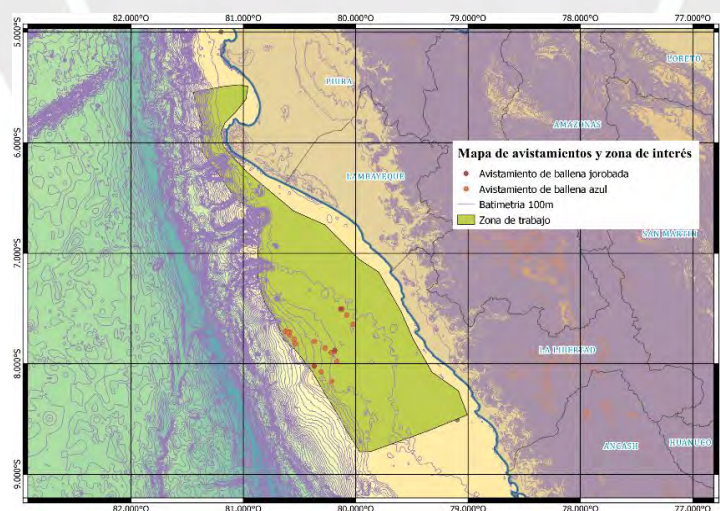


Figura 1.3 Mapa de la zona interesada de trabajo Piura-Lambayeque-La libertad  
Fuente: Elaboración propia

## 1.2 Propuesta de solución

Ante la problemática descrita anteriormente, se busca el diseño de un vehículo autónomo de superficie autopropulsado con propósito de monitorear el territorio marítimo frecuentado por

la ballena jorobada y azul. Principalmente con función de identificación de las especies usando su bioacústica junto al mapeo limpio de distribución de zooplancton. Además, contempla la recolección de datos oceanográficos esenciales para modelar el entorno marítimo.

### **1.3 Alcance**

La propuesta considera el diseño de un vehículo no tripulado de superficie, que se pueda emplear de manera autónoma en zonas que poseen características del hábitat idónea y que se hayan adquirido conocimiento de avistamiento de las especies en interés. Las simulaciones contemplan la comprobación de algoritmos de navegación y control mediante datos simulados de obstáculos, junto a la comprobación del algoritmo de detección de ballenas mediante grabaciones de cetáceos provenientes de librerías, y un diseño mecánico con simulación de autopropulsión por hidroala.

### **1.4 Objetivos**

#### **Objetivo general**

Diseñar un vehículo de superficie no tripulado, capaz de detectar ballenas jorobadas y azules en tiempo real, mientras que recopila datos de la distribución del zooplancton, junto a variables esenciales oceanográficas. El área de operación será desde Sechura, Piura hasta Salaverry, La Libertad, debido a que es una zona con intensa actividad antropogénica.

#### **Objetivos específicos:**

- Desarrollar el diseño conceptual del vehículo no tripulado de superficie abarcando sus diferentes subsistemas y sistema integrado. El cual se obtendrá a partir de un concepto de solución, escogido a través de una evaluación de aspectos técnicos y económicos.
- Diseñar el subsistema de navegación autónoma, que incluye el control de movimiento en un camino predefinido, y capacidad de evasión de obstáculos dinámicos y estáticos, tales como embarcaciones y boyas de redes de pesca.
- Crear el subsistema mecánico de la embarcación, englobando la forma y distribución de los cascos, así como el diseño del mecanismo de propulsión a base de olas, con la elección y dimensionamiento de una subunidad sumergida con hidroalas.
- Estructurar el subsistema de monitoreo de variables oceanográficas esenciales para medir temperatura, salinidad, nivel de pH y oxígeno disuelto. El cual también incluye el mapeo distribucional de zooplancton. Asimismo, se diseñará el subsistema de detección de cetáceos con algoritmos para el pre-procesamiento e identificación de las especies de ballena jorobada y ballena azul analizando su bioacústica.

- Diseñar el subsistema de generación de energía a base de la energía solar para el funcionamiento del vehículo por tiempo prolongado, según características solares del área de operación. Acompañado de la elección del subsistema de comunicación satelital en tiempo real para transmitir la ubicación del vehículo, y las identificaciones de cetáceos.
- Realizar un análisis detallado de los costos de manufactura, operación y mantenimiento de los diferentes subsistemas mencionados.

## **1.5 Metodología**

La metodología de diseño a seguir para el desarrollo del presente proyecto será la norma VDI 2221. Primero, el diseño del vehículo de superficie no tripulado comenzó con la investigación de la situación y características de los cetáceos y zooplankton en la costa norte del Perú. De esta manera, se plantea una propuesta de solución, con objetivos generales y específicos necesarios según cada subsistema identificado. Por consiguiente, se prosigue a realizar una descripción de características oceanográficas del entorno y estado de tecnología de los vehículos desarrollados en investigaciones y comercialmente orientados al monitoreo usando la acústica submarina. Con esta información, se redacta una lista de exigencias y requerimientos del proyecto.

Por consiguiente, se iniciará con una abstracción del sistema total del vehículo no tripulado de superficie, para luego desarrollar la estructura de funciones óptima y comprender las acciones de los dominios. Así, se procede a realizar conceptos de solución para la propuesta a base de una matriz morfológica general del vehículo. Finalmente, tras desarrollar un estudio de criterios técnicos y económicos se escoge un concepto de solución óptimo para el vehículo de superficie no tripulado dirigido al ecosistema marítimo del norte del Perú. Por último, se prosigue al diseño de los subsistemas con las siguientes características:

### **Subsistema mecánico del vehículo de superficie**

Se empezará con el diseño de los cascos que cumplan con los requerimientos de estabilidad de la Organización Internacional Marítima (IMO) regulación A. 749, baja fuerza de resistencia usando el método ITTC1957 del comité internacional de Tanques de Remolque (ITTC) y dimensionar con modelado en software Rhinoceros junto a una evaluación hidrostática en el *software* Polycad. Además, a partir de la fuerza resistiva de la embarcación se diseñará la subunidad sumergida para la propulsión en base de olas, eligiendo hidroalas con perfiles NACA-0012, y comprobación de fuerzas con simulación en ANSYS FLUENT. Seguido, se

encuentra la elección de propulsores auxiliares y componentes necesarios como controladores de velocidad.

### **Subsistema de navegación del vehículo autónomo**

Por otro lado, en el aspecto de la navegación, el diseño del subsistema comienza con el desarrollo de la planificación global en el lenguaje de programación *python* seguida de la planificación local con el algoritmo de *Line of sight* en *C++*, bajo las reglas de navegación COLREG. Esta evasión de obstáculos debe nutrirse de componentes de percepción, como las cámaras estereoscópicas, y radar para detectar los obstáculos estáticos y dinámicos. Por último, debe diseñarse del controlador de propulsores y timón con simulación en Matlab, integrado al modelo del vehículo.

### **Diseño del subsistema de monitoreo**

En paralelo, se desarrollará la elección de los sensores a emplearse para los monitoreos oceanográficos de pH, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto. Por otro lado, se deben elegir los parámetros del ecosonda según el fundamento teórico ambiental del entorno marino. Además, se encuentra el diseño del arreglo de hidrófonos con análisis de directividad en Matlab. En el aspecto de la detección de cetáceos, se empezará con el cálculo de los parámetros adecuados para aplicar la normalización de energía por canal (PCEN). Seguido, de la preparación de la data recolectada de repositorios de *Macaulay Library* y *Watking Marine Mammals Database* para introducirse a una transferencia de aprendizaje a la red ResNet 50 empleando procesadores virtuales como *GoogleColab*.

### **Diseño del subsistema de energía y comunicación**

Para poder realizar la evaluación energética y determinar los paneles solares para garantizar la misión prolongada es necesario conocer el consumo energético de todos los componentes de los subsistemas, y así determinar la cantidad y arreglo de los paneles. En el caso de la comunicación, se debe elegir los componentes necesarios para la transmisión satelital en tiempo real basado en la cantidad de datos destinados a enviarse.

## CAPÍTULO II: Estado del arte

A continuación, se procederá en primer lugar describir el estado de tecnología de los vehículos comerciales y luego explicar sobre el estado del arte del monitoreo de cetáceos y zooplancton.

En las últimas décadas, se ha incrementado la preocupación por el impacto de la contaminación acústica subacuática en los mamíferos marinos. Ante esto, hay distintas instituciones que implementan un monitoreo de distintos tipos. Uno de ellos es el monitoreo de mitigación, el cual posee el fin de proteger los animales cercanos o dentro de una área peligrosa, siendo esta predefinida mayormente relacionada con fuentes de sonido antropogénico con un radio típico desde 500 metros a 3000 metros, teniendo como prioridad implementar una localización con buena precisión de los mamíferos junto a una comunicación y procesamiento en tiempo real, incluso un sistema confiable de navegación en lugares con tráfico.

Para todos los tipos de monitoreo, los vehículos no tripulados son los más capaces de incrementar el monitoreo marino debido a que no implica exposición a riesgo alguno, es posible repetidas investigaciones, y ayuda a reducir costos. Además, permite un mayor campo de detección que la observación humana. Los vehículos desarrollados son los no tripulados aéreos (UAS), en la superficie (ASV) y bajo el agua (AUV), ver Anexos A.1. En el caso de los vehículos de superficie tienen el mayor tiempo de operación, junto a la capacidad de operar en grandes corrientes, de las cuales obtiene energía o bien con el viento para su movimiento, junto a su constante comunicación. Así posee potencial de desenvolverse bien para el monitoreo de mitigación en tiempo real.


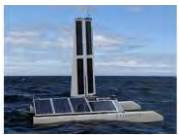

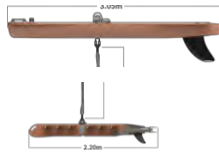
### 2.1 Vehículos no tripulados propulsados por olas o aire

Dentro de los vehículos no tripulados de superficie, se encuentran los vehículos de superficie propulsados por el aire. Básicamente, sigue el mecanismo del velero, el cual consiste en propulsarse usando una vela o ala la cual impulsa al interactuar con las corrientes del viento. Mayormente poseen un motor el cual se encarga del giro de la vela, además cuentan con un suministro de energía con paneles solares, los cuales llegan a abastecer a un equipo de sensores.

Tal como se aprecia en la Tabla 2.1, los sistemas comerciales se caracterizan por una considerable velocidad promedio de 3 nudos. Además, existen diseños que llegan a una duración de hasta 1 año. Es por ello, que se han estado estudiando diferentes aplicaciones, como monitoreo oceanográfico de amplias áreas, teniendo mayor cobertura que los demás sistemas presentados, tal como se observa en el observatorio LoVe en la Noruega Ártica donde el vehículo *Sailbuoy* obtuvo en menor tiempo mayor cantidad de datos oceanográficos (Camus

et al. 2021). En el campo del monitoreo de mamíferos marinos usando la bioacústica, se han realizado misiones en el mar baltico con el vehículo llamado *Roboat* y en la costa de Sesimbra en Portugal con el vehículo *FASt* (Delory & Pearlman, 2019). Sin embargo, la misma naturaleza de alta velocidad de movimiento, genera dificultades con el monitoreo acústico pasivo, ya que incrementa el ruido generado con las olas de superficie.

Tabla 2.1 Comparación de vehículos no tripulados propulsados por aire

	Saildrone	Datamaran	AutoNaut	Wave glider
<b>Aspecto</b>				
<b>Dimensiones</b>	5x7m (calado 2m)	3.7x2x3.1m (0.3m)	5x0.7x1.5m	3 x81x 23cm sub:2.1x1.4x 21
<b>Peso</b>	750 kg	192 kg	120 kg	150
<b>Velocidad</b>	3 nudos	No especifica	2-3 nudos	1.5 nudos
<b>Viento</b>	No especifica	5.8 - 40.8 nudos	-	-
<b>Duración</b>	hasta 12 meses	6 meses	3 meses	máx 1 año
<b>Compañía</b>	Saildrone, Inc.	Autonomous Marine Systems, Inc.	AutoNaut	Liquid Robotics, Inc
<b>Funcion</b>	Recolección de datos de pesquería y meteorológico-oceanográfico, monitoreo de ecosistema	Toma de datos meteorológico-oceanográfico. Monitoreo acústico de mamíferos marinos. Punto para red de comunicación	Monitoreo ambiental, seguridad portuaria de inteligencia y vigilancia, muestreo de ciencias oceanográficas.	Monitoreo meteorológico-oceanográfico, bioacústico tanto de animales marinos como el ecosistema, aplicado en defensa marina e industria del óleo y gas.

Por último, en la Tabla 2.1 también se puede observar los vehículos de superficie que utilizan energía de las olas sin propulsores, sin embargo, algunos lo utilizan en caso de no existir olas. Tal como se describe, implementan mayor velocidad comparado con los vehículos bajo el agua (glider) y son apropiados para un monitoreo prolongado con capacidad de operar diversos equipos de sensores oceanográficos. En el caso del *wave glider*, se ha implementado en lugares con fuertes corrientes con el objetivo del monitoreo acústico como el caso de Atlántico Norte antes mencionado, mediante una subunidad sumergida que se propulsa con las olas. En cambio, el vehículo *Autonaut*, consiste en dos alas en los extremos que funcionan al moverse ascendente y descendente proporcionando sustentación. Sin embargo, similar al caso de los vehículos

superficiales de viento, el sonido de la superficie con las olas, junto al arreglo de la subunidad en el caso del *wave glider*, aún ocasionan interferencias en el monitoreo acústico.

## 2.2 Sistema de monitoreo de cetáceos

Los hidrófonos son equipos usados para grabar las señales acústicas en el océano con fines de investigación. Estos tienen la capacidad de estar en modo de grabación asistida, en el cual graba la acústica y la envía en tiempo real vía cable a la unidad de control. Así como también estar en modo de grabación independiente en el cual está equipado de baterías y una memoria externa. En anteriores proyectos, el monitoreo acústico pasivo en cetáceos se ha logrado implementando el instrumento digital de monitoreo acústico (DMON), el cual consiste en un hidrófono con grabador y procesador. Junto con un sistema de detección y localización de baja frecuencia (LFCDS), tal como se observa en la Figura 2.1. De esta forma, detecta y clasifica firmas acústicas en ambientes cargados, pues primero crea un espectrograma, detecta los sonidos y la firma acústica, la cual clasifica usando un análisis de función discriminante en un librería de cantos. Por último, la información extraída se transfiere en cerca tiempo real independientemente del control y comunicación del sistema. La desventaja de esta modalidad de reconocimiento por firma es la cantidad de datos que ocupa en cada detección, pues por motivos de costos normalmente la cantidad de información enviada por satélite es reducida. Tal fue el caso del monitoreo de ballenas barbadas en el golfo de Maine, donde el *Wave Glider* enviaba 8kB cada 2 horas, causando que falle en detectar más avistamiento al llenar su capacidad rápidamente (Ball et al. 2021).



Figura 2.1 Electrónica de DMON  
Fuente: (Ball et al. 2021)

Las mayores dificultades que enfrenta la detección de cetáceos es la existencia del ruido del fluido, superficie y mecanismos que usa el vehículo. Pues, en el caso de los vehículos de superficie la cercanía de la unidad de monitoreo a la superficie junto a la velocidad, corrompen la información acústica tal como se observa en la Figura 2.2, en el caso del vehículo *Saildrone*. Esta fuente fue tratada de erradicar en el *wave glider*, usando sin éxito deflectores llenos de aire. Tras descartar profundizar la medición del hidrófono mediante un arreglo cable-equipos, al verse expuesto al peligro de enredo con mallas de pesca, se han desarrollado investigaciones

para reducir las fuentes de ruido. Como el uso de un arreglo de hidrófonos, en base a la idea de que la grabación en conjunto puede reducir el ruido en general, tal como se observa en la Figura 2.3 (b).

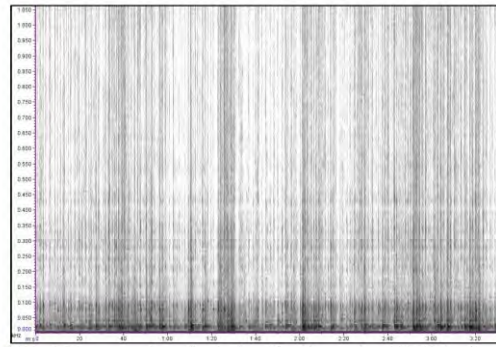


Figura 2.2 Espectrograma de ruido en Saildrone  
Fuente: (Saildrone)

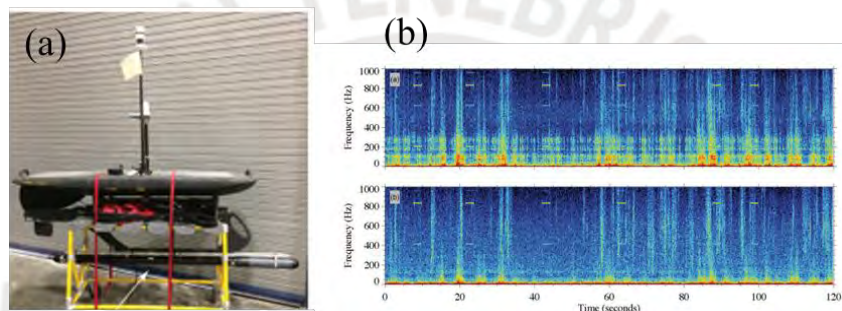


Figura 2.3 (a) Arreglo horizontal de hidrófonos y (b) espectrograma de grabación con un solo hidrófono (superior) y con el arreglo horizontal (inferior)  
Fuente: (Ball et al. 2021)

Por otro lado, existe la propuesta de una detección de eventos acústicos mediante agrupación de magnitud luego de una normalización de energía por canal (PCEN). El cual, a pesar de haber sido diseñado para reconocimiento de voz, tiene efectos beneficiosos para las vocalizaciones de animales en presencia de ruidos intermitentes, ver Figura 2.4. Así, se ha comprobado que, en comparación con el logaritmo puntual, PCEN reduce la velocidad de falsas alarmas por 50x de cerca y 5x en zonas lejanas en librerías de vocalizaciones marinas y de aves. Implicando un moderado costo computacional y mejoras de detecciones en los sistemas de monitoreo acústico y más en los aún en proceso, sistemas con redes neuronales (Bello et al. 2018).

Por último, se han logrado avances representando los audios como espectrogramas de dos dimensiones e implementando la detección con redes neuronales convolucionales (CNN). Como resultado se alcanza mayor precisión que los métodos que usan la firma acústica, incluso con mejor éxito que las redes neuronales concurrentes (Lee et al. 2021). Tal es el caso de Google con 90% de precisión usando la arquitectura ResNet-50 para desarrollar una CNN para ballenas jorobadas y el uso de CNN para detectar los clics de ecolocalización de cachalotes con

una precisión de 99.5% usando 650 espectrogramas, 325 de cada clase (clic o no clic). Con una optimización en base de búsqueda de cuadrícula para hiperparámetros y 100 imágenes para testeo (Bertmant et al. 2019).

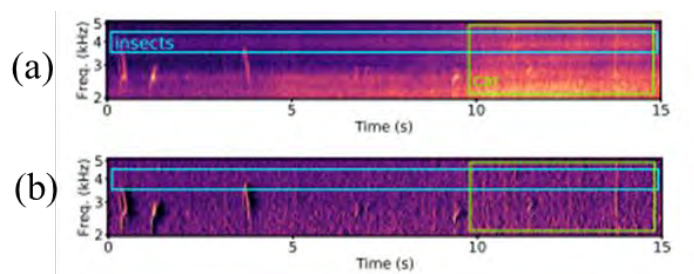


Figura 2.4 Transformación logarítmica a) y PCEN en b)  
Fuente: (Bello et al. 2018)

La mayor dificultad de la clasificación es la presencia de ruidos en las grabaciones, por ello se opta construir los modelos tomando en cuenta las características del sonido o remover el ruido antes de la clasificación. Últimamente, se ha presentado una consideración de ambas opciones con objetivo de aumentar la robustez del modelo. Una propuesta de modelo de redes neuronales robustas para ballenas francas en atlántica de norte, sigue los proyectos pasados de usar el espectrograma de entrada a una CNN usando métodos de entrenamiento aumentados y eliminación de ruido previa clasificación. En esta última, se compara un auto codificador eliminador de ruido DAE frente a una red neuronal convolucional eliminador de ruido DNCNN, entre los cuales el DAE obtuvo mejores resultados tanto en un modelo no entrenado con data corrompida como con el modelo entrenado con audios con ruidos, sin embargo, no erradica los ruidos; por ello, se acentúa la decisión de entrenar las redes con data ruidosa (Lee et al. 2021).

### 2.3 Sistema de mapeo de zooplancton

El muestreo de zooplancton puede ser de dos tipos dependiendo del propósito de estudio: cualitativo y cuantitativo. El primero, se usa cuando el objetivo es obtener una idea de las especies presentes, y en muchos casos para documentar cambios estacionales. Mientras que el cuantitativo, se aplica para determinar la abundancia de especies. En ambos casos el equipo para el muestreo consiste en la red de plancton, hecho usualmente de malla de nylon (50-300  $\mu\text{m}$ ). En cuanto a los métodos usados en Perú para la colección de muestras, tanto de fitoplancton como zooplancton, se obtiene mediante filtrado de un volumen conocido de agua a través de la red de plancton.

Sin embargo, otras técnicas ópticas y acústicas han sido usadas para el estudio del zooplancton. Las ópticas tienen la incapacidad de dar datos en alta resolución o taxonomía detallada.

Mientras que las acústicas son capaces de dar información en alta resolución de espacio y tiempo, en comparación con los métodos de red, lo cual ha permitido estudios de conducta como la migración vertical de los anfípodos o el hábitat horizontal comunitario del zooplancton. Aquello, se logra mediante la medición de energía de objetos en la columna de agua, lo cual implica que se dificulta la interpretación cuando existe una variedad de organismos. Ya que se podría saber la abundancia numérica, si solo si hay una única especie presente y se sabe la cantidad de energía dispersada por un solo organismo. Las sondas náuticas con finalidades de clasificación de especies (peces y zooplancton), operan en 18 kHz, 38 kHz, 120 kHz, y 200 kHz con alcance de varios cientos de metros, y para detectar organismos <2mm se necesitan mayores frecuencias, tal fue el caso en lagos con 430 kHz y bahías costeras con 710 kHz (Leach et al. 2016).

Una aplicación es el *proyecto Glider* en Noruega ártica con una sonda náutica científica Simrad WBT Mini montado en el vehículo *Wave Glider* y otro en *Sailbuoy*. Si bien su diseño es para plataformas estacionarias, fue empleado obteniendo información de densidad y distribución de zooplancton, lo cual sería imposible con expediciones normales con embarcaciones de investigación. Ya que debido a la reflexión que existe con la superficie del barco y la contaminación lumínica, las sondas náuticas no pueden dar información más allá de 20 metros. El *Wave Glider* operó con dos transductores con frecuencias centrales de 70 y 333 kHz, mientras el vehículo *Sailbuoy* con 333 kHz (Camus et al. 2021).

Durante las misiones, encontraron que el vehículo propulsado por olas tuvo dificultades para captar información limpia. Por un lado, existió un ruido e interferencia eléctrica en comparación con el *Sailbuoy*, pues el ecosonda no era energizado independientemente. Por otro lado, se identificó una interferencia con la subunidad sumergida del *wave glider*, tal como se observa en la Figura 2.5 (a) y el resultado es la generación de líneas horizontales en el espectrograma Figura 2.5 (b).

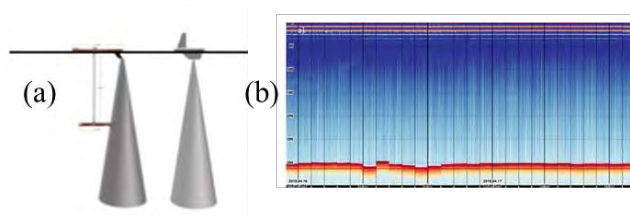

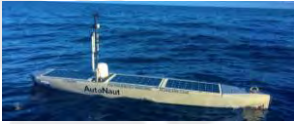


Figura 2.5. Mapeo de zooplancton con ecosondas en sailbuoy y wave glider en a) y espectrograma con interferencia de wave glider b)

## 2.4 Monitoreo de variables oceanográficas

Tal como se observa en la Tabla 2.2, tanto los planeadores como con vehículos autónomos de superficie, se aplican para la recolección de datos del ecosistema marino referente tanto a propiedades del agua como las meteorológicas. Con las primeras, se suele monitorear la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, pH, clorofila, turbidez y cantidad de nutrientes; con objetivo de determinar el estado químico y ambiental de las aguas de la zona investigada. Por otro lado, aplicaciones como *Saildrone* poseen sensores para determinar la intensidad y dirección de vientos, medir la luz solar junto a la radiación infrarroja, temperatura de aire, humedad, presión y  $pCO_2$  del aire. Cuyas mediciones sirven para conocer condiciones ambientales y meteorológicas del ecosistema marino, durante el tiempo y espacio de la misión.

Tabla 2.2 Comparación de vehículos planeadores y de superficie

	AUV (Planeadores)	ASV
		
<b>Aplicación</b>	Identificación, clasificación y localización de cetáceos por bioacústica. Monitoreo de condiciones del ecosistema marino bajo el agua.	
	Inspecciones del suelo para mapas, recolección de información de navegación.	Estudio de variables oceanográficas como viento, nivel del agua, etc.

### **CAPÍTULO III: Diseño conceptual del vehículo de superficie no tripulado para monitoreo acústico y oceanográfico**

En este capítulo, se presentará primero un resumen de la lista de requerimientos que debe cumplir el concepto óptimo. Además, se introducirá una estructura de funciones, seguido del concepto óptimo de solución.

#### **3.1 Lista de requerimientos**

La lista de requerimientos se presenta en Anexos A.4, mientras la justificación de las exigencias se desarrolla a continuación:

- ❖ *Función principal:* El vehículo de superficie no tripulado debe identificar y localizar ballenas jorobadas y azules, mientras mapea zooplancton y acumula datos oceanográficos.
- ❖ *Geometría:* Se debe buscar el mayor espacio para paneles solares. Además, es importante una estructura reducida y ligera, ya que el transporte debe ser posible en embarcaciones auxiliares de reducido costo, como remolcadores que poseen un gancho hidráulico, y una manga (ancho) de 13 metros. Y el transporte por tierra debería ser posible en un camión de doble cabina con espacio de carga: 2100 mm x 4000 mm.
- ❖ *Cinemática:* Para poder maniobrar el vehículo es necesario poder tener una velocidad promedio de 1.5 nudos y máximo de 5 nudos, con un desplazamiento de avance y guiñada, de esta forma pueda trasladarse en trayectorias.
- ❖ *Fuerza:* Según las características de las corrientes indagadas en el marco teórico, el vehículo para moverse tendrá que vencer velocidades entre 20 cm/s (0.39 nudos) hasta 34 cm/s (0.66 nudos).
- ❖ *Energía:* La ejecución de la misión debe realizarse en las temporadas de otoño e invierno, durante el periodo de migración, por lo cual el tiempo de autonomía debe ser entre 3 a 4 meses (julio, agosto, septiembre y octubre); y debe contar con un suministro de energía estable durante la operación constante del vehículo, por ello es necesario usar energía solar.
- ❖ *Control:* Para poder maniobrar la dirección del vehículo es necesario el control del timón. Además, se contempla la navegación autónoma por la mayoría de tiempo con detección pasiva. Para el caso de evasión de obstáculos dinámicos, se incluye el control de propulsores.

- ❖ *Electrónica*: debe existir un controlador de los componentes electrónicos y ordenadores para la detección de cetáceos, y la navegación autónoma. Como la comunicación es limitada y la acumulación de datos es prolongada, se exige un almacenamiento para todas las variables de monitoreo.
- ❖ *Seguridad*: el vehículo debe poder recibir un comando de parada de detención total, con el cual todas las operaciones son detenidas. Debido al entorno marino, debe existir una protección con grado de IP67, no se requiere mayor grado debido a que los componentes estarán en la plataforma de superficie sin entrada de agua.
- ❖ *Comunicación*: Con objetivo de que el monitoreo de cetáceos puedan llegar a ser usado para regular actividades antropogénicas, debe transmitir las detecciones en tiempo real. Por ello se exige una comunicación satelital de ello junto a la posición del vehículo, para un seguimiento adecuado. En cuanto al modo de comunicación remota para recuperación y entrada de vehículo, al tratarse de mar abierto debe ser de alcance de 1500 m, incluyendo seguridad en el intercambio de información.
- ❖ *Software*: Para poder realizar la identificación de cetáceos, se requiere desarrollar un algoritmo de detección. Previamente, incluir un preprocesamiento para reducir ruido que dificulte la detección. Además, debe implementar un algoritmo de planeamiento de ruta para evitar obstáculos dinámicos y estáticos.
- ❖ *Fabricación*: El material de fabricación del casco debe ser fibra de vidrio o plásticos reforzados de vidrio, para reducir el peso y sea factible la implementación de distintas formas. Además, al tener una larga duración y los mecanismos de propulsión estarán sumergidos, debe considerarse el proceso de revestimiento con pintura anti-bioincrustaciones con su limpieza posterior para evitar obstrucciones.
- ❖ *Uso*: El vehículo debe considerar las características del entorno en cuanto al viento, corriente, longitud de onda y condiciones climáticas como neblina, descritas en Anexos A.2. Además, la evasión de obstáculos debe seguir las normas del reglamento COLREG para evitar colisiones.
- ❖ *Costo*: Para poder ser implementable, el vehículo debe presentar un diseño de bajo costo comparado con las opciones comerciales, los cuales llegan a 150.000 dólares.

## **3.2. Determinación de estructura de funciones**

### **3.2.1 Black box**

En esta etapa, se realiza una abstracción de la función total del sistema mediante la representación de *Black Box* o Caja Negra, la cual señala las entradas y salidas clasificadas como energía y señales. El *black box* expresa el proceso técnico a realizar para transformar las propiedades de las entradas, tal como se observa en la Figura 3.1.

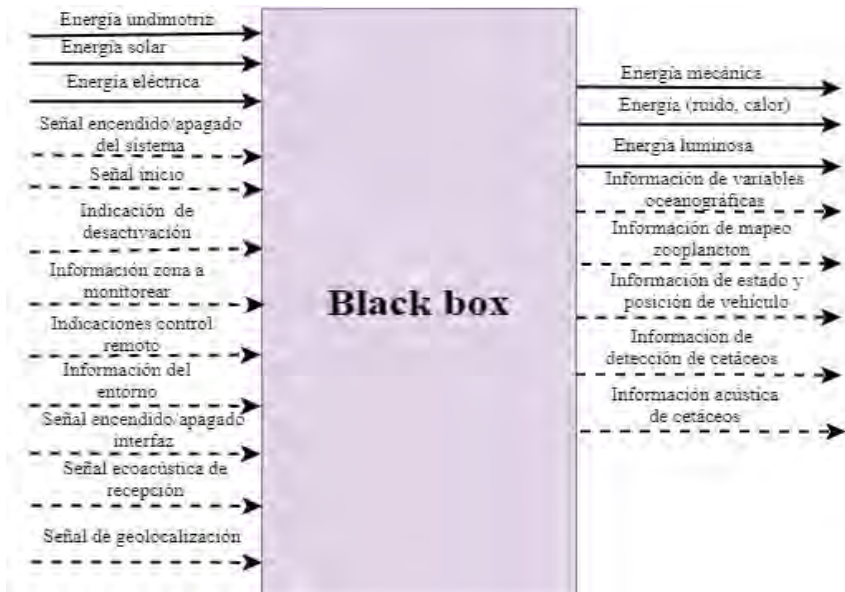


Figura 3.1 Caja negra del sistema

### 3.2.2 Estructura de funciones

A continuación, se presenta en la Figura 3.2 la estructura de funciones integrada donde en primer lugar se divide en el componente interfaz/usuario y el vehículo autónomo, al estar físicamente separados, pero bajo ciertas condiciones intercambian información. En el caso del sistema de vehículo de superficie, presenta un dominio de energía el cual abastece a los diferentes elementos de los demás dominios. Luego, presenta un dominio de sensores el cual representa los componentes que medirán las variables a monitorear. Por consiguiente, existe un dominio mecánico con las estructuras requeridas que se alimenta del dominio de actuadores. Por último, el dominio de control encargado de la autonomía en navegación del vehículo.

## 3.3 Conceptos de solución

### 3.3.1 Matriz morfológica

En Anexos A.7, se encuentra la matriz morfológica con los diferentes componentes que forman los conceptos de solución, en el aspecto mecánico se exponen tres mecanismos los cuales se enfocan en la propulsión a base de recursos del medio como olas o viento, con finalidad de obtener una duración prolongada de navegación. Mientras que, en el arreglo de los cascos se prefieren el catamaran y trimaran por su mayor estabilidad y reducción de resistencia.

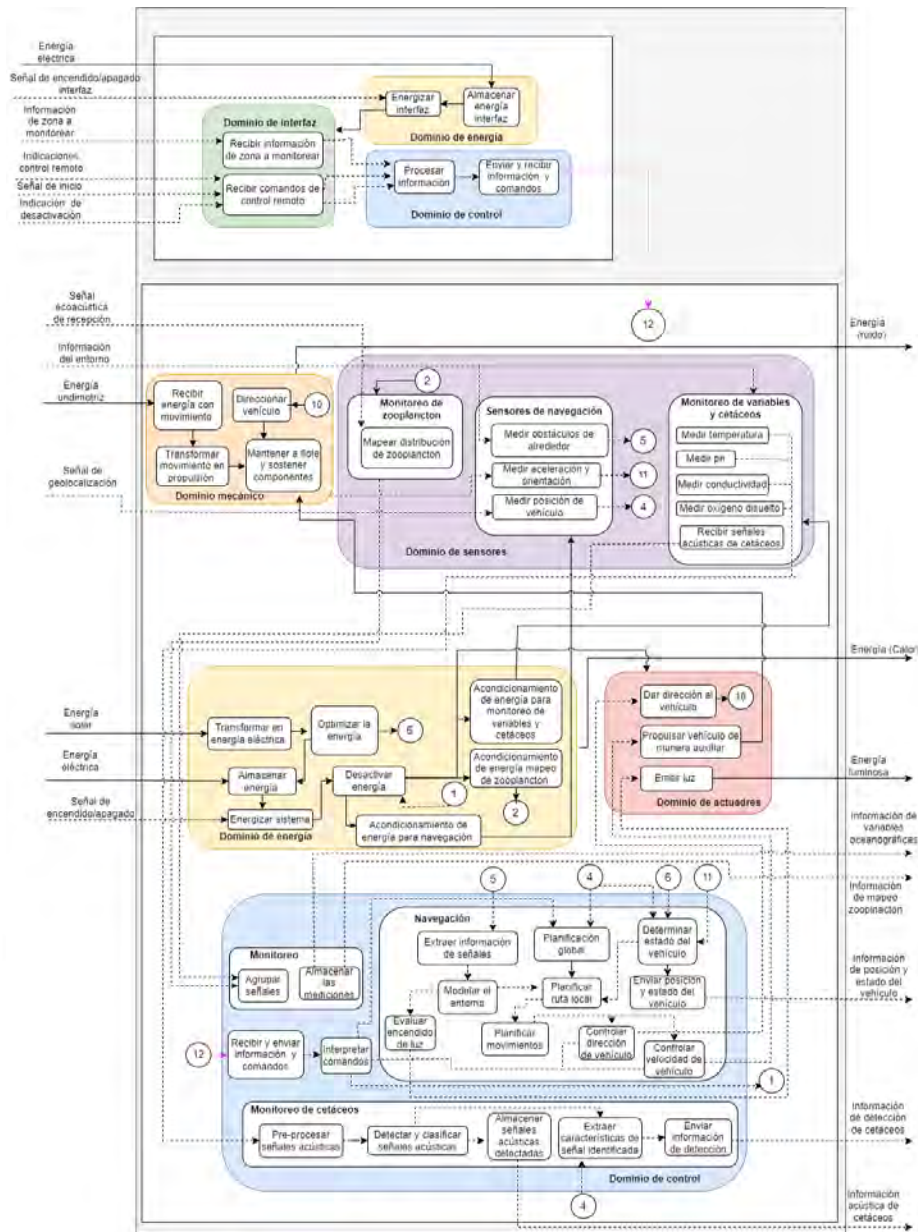


Figura 3.2 Estructura de funciones integrada

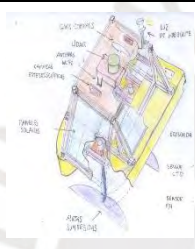
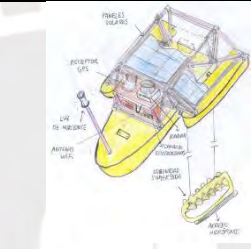
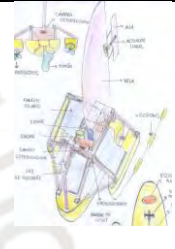
Proseguido del dominio de energía, donde se emplea la energía solar proponiéndose tres sistemas, donde el primero y tercero usa un arreglo en serie con un optimizador que soporta distintos niveles de entrada y salida de voltaje. Mientras que la segunda propuesta es más económica con otro tipo de optimizador que requiere de un arreglo en paralelo de paneles con baterías de ciclo profundo.

En el dominio de sensores se diferencian en características económicas y de entorno de aplicación, por ejemplo, el sensor CTD e ISFET son diseñados especialmente para aplicación de investigación oceanográfica. En el aspecto del monitoreo acústico de cetáceos, se propone el empleo de monitoreo pasivo con tipos de arreglos de hidrófonos que pueden optimizar la disminución de ruido (arreglo compacto) o mejorar la localización de cetáceos (arreglo

distante); mientras otra opción es la del empleo de un hidrófono programable comercial.

En el dominio de actuadores, se presentan opciones que van de acuerdo al sistema mecánico de cada solución, por ejemplo, la tercera solución requiere de actuadores para el equilibrio y dirección del vehículo mediante el giro de la vela. Junto al dominio de control, el cual principalmente se puede separar en la agrupación y almacenamiento de señales recolectados por el sistema de sensores oceanográficos; la detección y localización de cetáceos; y la navegación autónoma. Con respecto al software del control, se proponen algoritmos para la detección de obstáculos móviles, planificación global, modelamiento del entorno y planificación local.

Tabla 3.1 Cuadro comparativo de conceptos de solución

	Concepto de solución 1	Concepto de solución 2	Concepto de solución 3
			
Ruido en bioacústica	Mediano nivel de ruido por hidrófonos cercanos a superficie y movimiento de cabeceo continuo por mecanismo de propulsión.	Bajo ruido debido a hidrófonos sumergidos a 5 m de profundidad, y un arreglo trimarán con menos área superficial de contacto.	Alto ruido por hidrófonos cercanos a superficie y autopropulsión ruidosa al emplear el viento.
Interferencia y estabilidad con ecosonda	Poca interferencia con las 2 aletas sumergidas y mediana inestabilidad por empuje en dirección vertical de la propulsión (cabeceo).	Mediana interferencia por subunidad sumergida y mayor estabilidad de posición al ser trimarán.	Nula interferencia y alta inestabilidad por características del viento y forma de propulsión dependiente de ello.
Capacidad energética	Mediana área disponible para paneles, baterías livianas, pero de menores ciclos de carga. Arreglo en paralelo	Mayor área disponible para distribución de paneles, y empleo de baterías con ciclo profundo.	Área reducida para paneles, arreglo en serie debido a sombras en paneles debido a la vela.
Sensores para autonomía	Capacidad de detectar obstáculos de manera menores a 2000 metros con lidar.	Capacidad de detectar obstáculos menores a 3000 km aproximadamente con radar.	Poca capacidad de detectar obstáculos por interferencias de vela con sensores.
Navegación autónoma	Planificación local sin contemplación de obstáculos estáticos a gran distancia como estaciones no identificadas en mapas disponibles, debido al solo uso de Lidar.	Planificación local que contempla obstáculos imprevistos y decide dirección a partir de reglas COLREG al usar el método velocity obstacle y algoritmo light of sight.	Planificación local con campos potenciales medianamente efectivo por posible inestable detección de obstáculos, a partir de la interrupción de la vela y baja contrabilidad
Estabilidad por tiempo prolongado de autopropulsión	Mediana durabilidad del mecanismo de propulsión al basarse en el movimiento de las olas más superficiales expuestas a condiciones como el viento.	Larga durabilidad por emplear las corrientes sumergidas presentes en el litoral, y menos resistencia al movimiento por arreglo trimarán (menor área de contacto).	Menor estabilidad de propulsión por zonas de mayor viento, y fuerzas resultantes pueden causar volcamiento.

### 3.4 Evaluación de criterios técnico-económicos

Se lleva a cabo una evaluación técnica y económica a cada uno de los conceptos de solución presentados anteriormente, ver anexos A.8. En la etapa de evaluación técnica se evalúa las dos principales funciones: mapeo de zooplancton y detección de cetáceos, donde resalta la solución 2 en cuanto a su efectividad, limpieza de datos y función prolongada. Luego, se examina su posible desempeño para la navegación autónoma, resaltando la solución 3, ya que el arreglo tiene mayor maniobrabilidad y el viento provee de mayor velocidad. Siguiendo con la evaluación de extracción de energía para abastecimiento de electricidad y propulsión, del cual resalta la solución 2, debido a que no genera sombras en los paneles y su propulsión funciona siempre que exista movimiento en las olas. Por último, la estabilidad, transportabilidad y montaje se evalúan, obteniéndose a la solución 1 con mejor puntaje al tener características de un montaje más factible comparada con las demás opciones.

Por el lado económico, en costos de tecnología, la solución 1 posee menor costo; pero esto implica menor preparación para navegar autónomamente pues posee menos sensores de percepción comparado con la solución 3. Luego, en los costos de operación resalta la solución 2, al emplear una comunicación satelital de menor costo, aunque menos cantidad de datos. En cuanto a estructura y mantenimiento, la solución 1, resalta al no poseer componentes sumergidos o expuestos de menor tamaño o sumersión. Por último, en el lado del transporte, la solución 2 resalta al poderse compactar durante el traslado del vehículo en tierra y mar. A continuación, en la Figura 3.3, se presenta los valores técnicos y económicos obtenidos, en un gráfico de dispersión, con el objetivo de encontrar un concepto de solución óptimo. Según el gráfico de dispersión, Figura 3.3, el concepto de solución ganador es el segundo.

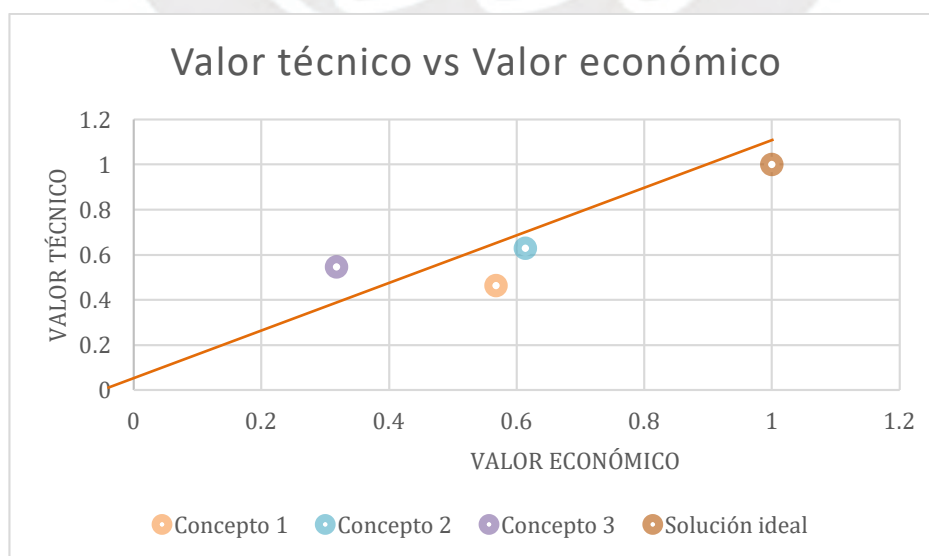


Figura 3. 3 Gráfico de dispersión

### 3.5 Concepto de solución óptimo

En esta sección, se presentará el concepto de solución óptimo del vehículo de superficie autónomo.

#### 3.5.1 Modelado 3D

En primer lugar, se presentará un modelado preliminar del arreglo de los cascos, junto a la estructura que sostiene los paneles solares a emplearse. Tal como se observa en la Figura 3.4 , el vehículo se sostiene a flote con tres cascos agrupados, los cuales son desalineados para poder hacer el traslado de la subunidad hacia la popa del vehículo de superficie.

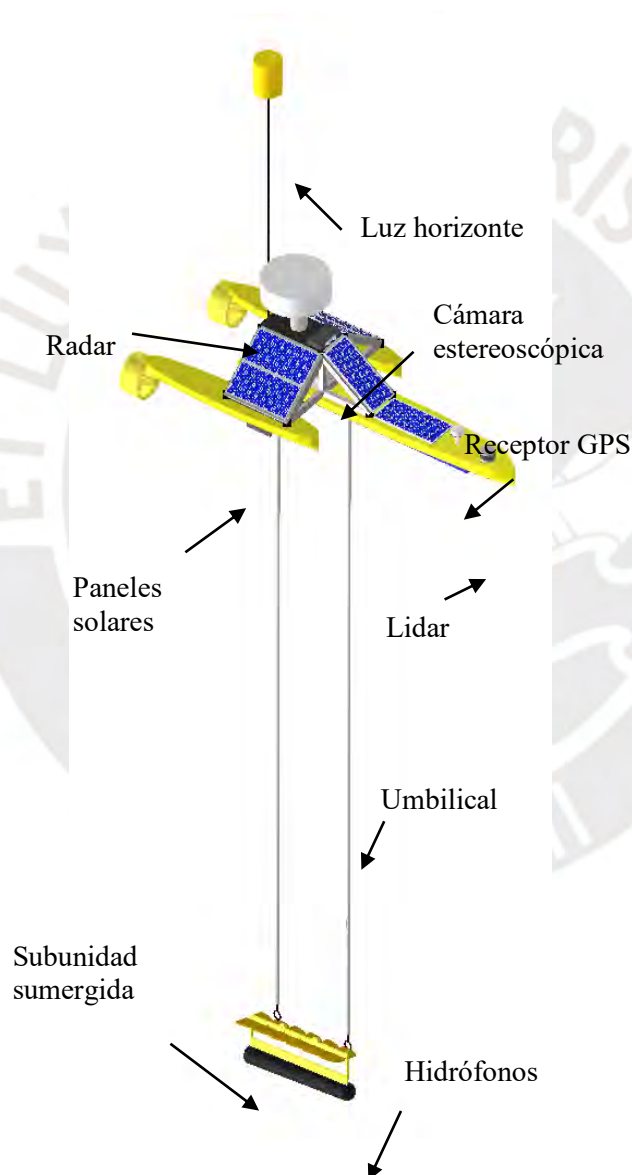


Figura 3.4 Modelado del proyecto preliminar

En la Figura 3.5, se puede apreciar mejor la unión de los cascos laterales con el casco central, los cuales se caracterizan por dotar la facultad de ser modular y es posible aplicar cierta posición relativa de los cascos laterales según requerimientos y características del movimiento.

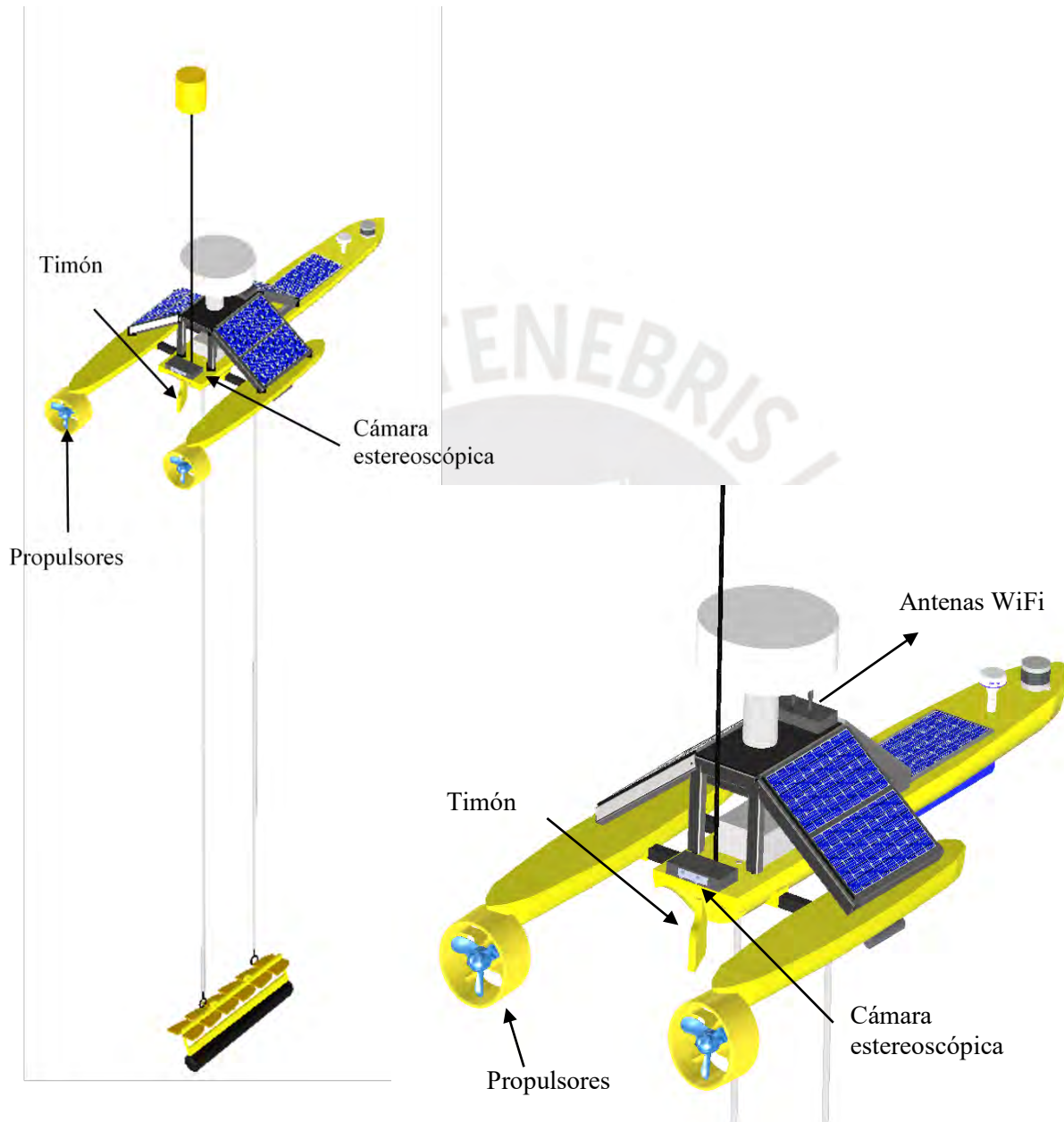


Figura 3.5 Vista inferior del modelado

En la vista de la Figura 3.5, se puede apreciar la parte posterior de la estructura de los paneles, los cuales, por dimensiones comerciales, permiten la disminución del largo, sin embargo, por el arreglo en serie y paralelo se torna necesario colocar una en la superficie del casco central en la parte de la proa del vehículo, tal como se aprecia en la Figura 3.6.

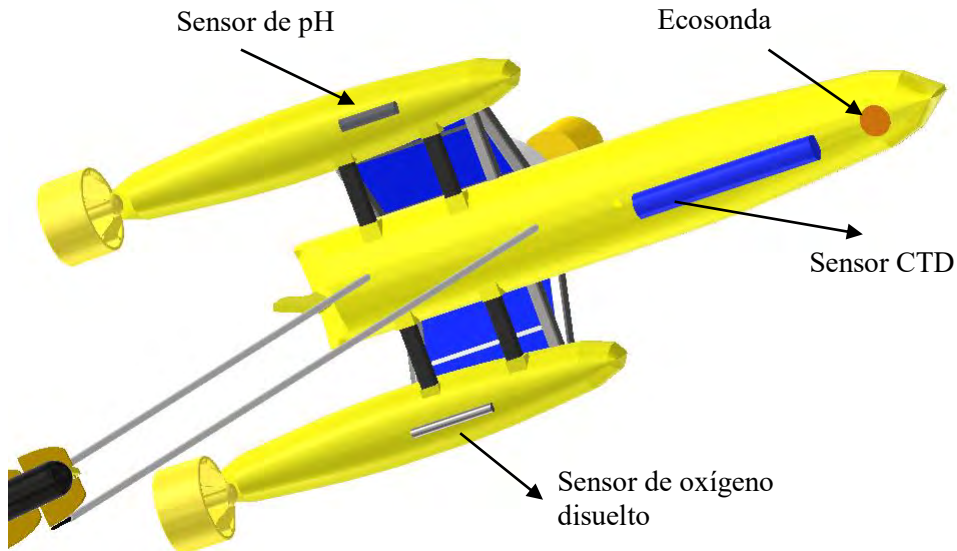


Figura 3.6 Vista posterior del modelado

Por último, se presenta el modelado preliminar de la subunidad sumergida del proyecto, la cual consta de seis alas por cada lado. Asimismo, de par en par son unidas mediante dos ejes, de los cuales solo un extremo tiene permite el movimiento relativo en un ángulo definido, tal como se aprecia en la Figura 3.7. Mientras que, en la parte inferior de la subunidad, se encuentra adherida el arreglo incorporado de hidrófonos, tal como se observa en la Figura 3.8.

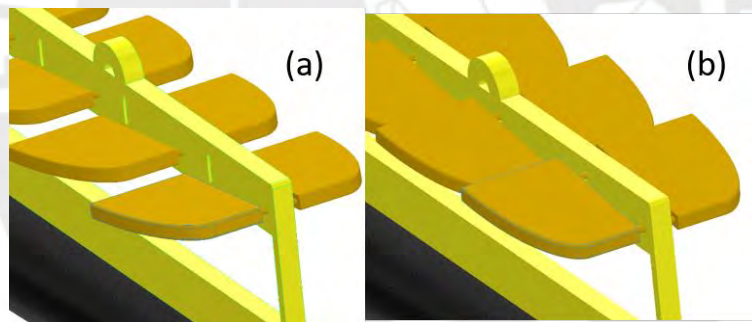


Figura 3.7 Vista acercada de alas pequeñas en movimiento ascendente de la ola (a) y en movimiento descendente de la ola (b)

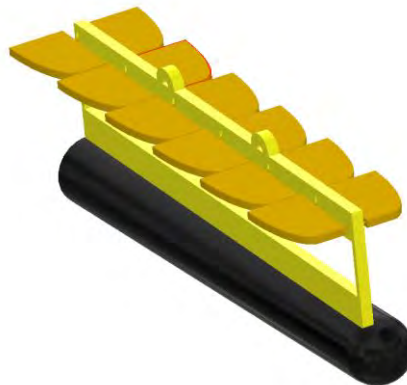


Figura 3.8 Vista alejada de subunidad sumergida

### 3.5.2 Diagrama de operaciones

Por otro lado, en la Figura 3.9 se presenta el diagrama de operaciones entre el usuario y el vehículo de superficie, para la ejecución de una misión de monitoreo y detección en un área determinada del norte del Perú.

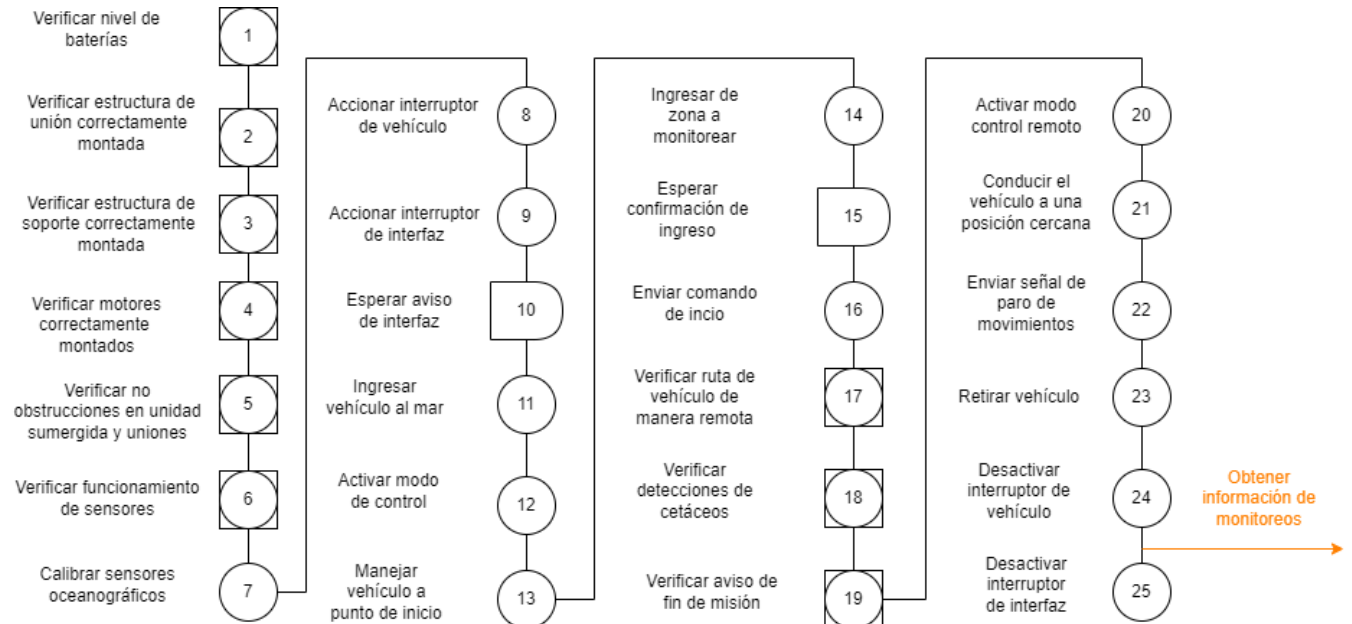


Figura 3.9 Diagrama de operaciones

### 3.5.3 Diagrama electrónico

A continuación, se presenta el diagrama electrónico entre los componentes seleccionados para el ejercicio de los subsistemas de navegación autónoma, monitoreo de variables oceanográficas y zooplancton, y energía.

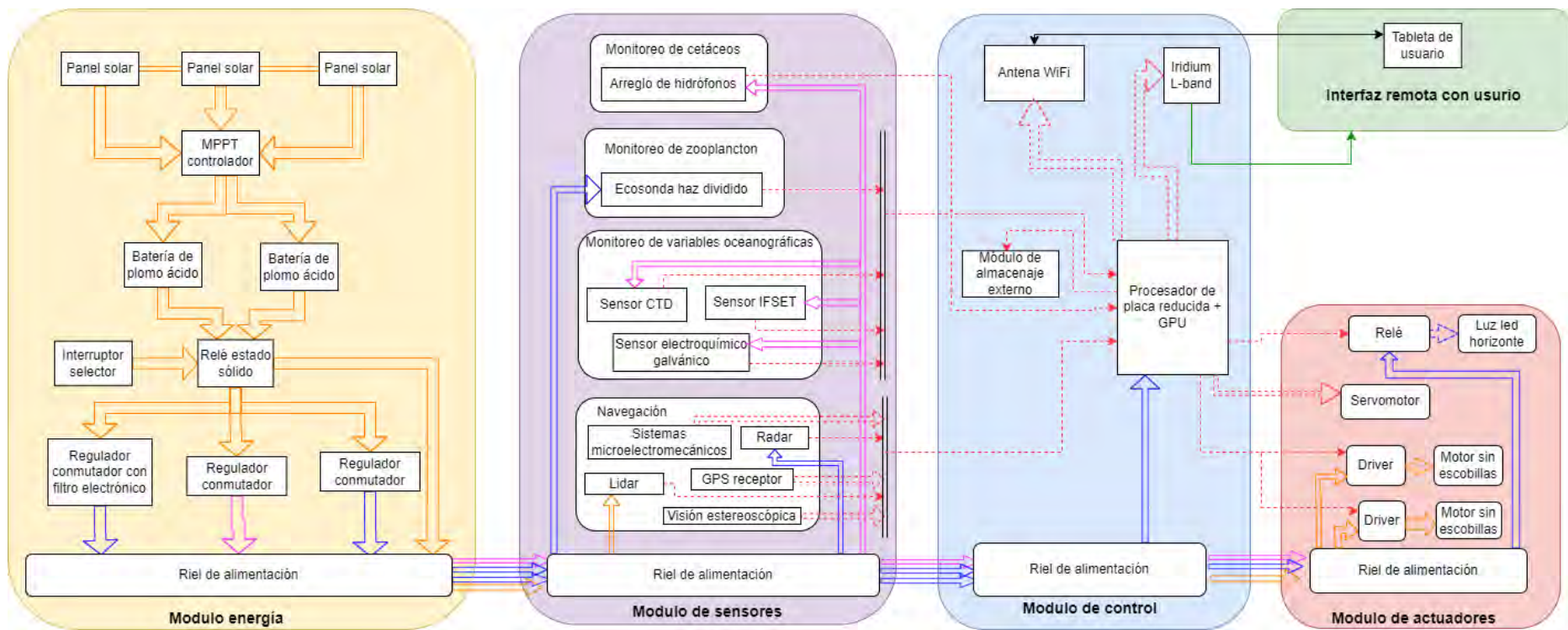


Figura 3.10 Diagrama de sistema electrónico

## CAPÍTULO IV: Diseño del subsistema mecánico del vehículo de superficie

A continuación, se llevará a cabo el diseño mecánico del vehículo de superficie, comenzando con el dimensionamiento y configuración del arreglo de los cascos. Seguido, de los mecanismos de propulsión, tanto con la subunidad sumergida como con la elección de propulsores a base del cálculo de la fuerza de fricción.

### 4.1 Embarcación

#### 4.1.1 Selección de material

En la actualidad los materiales empleados para la construcción de embarcaciones son el acero, aluminio, fibra de vidrio y poliuretano. En el caso del acero, se emplea desde hace mucho tiempo por sus propiedades mecánicas y relativo bajo costo, sin embargo, estas características no compiten con los nuevos materiales compuestos. El aluminio, presenta bajo peso y adecuadas propiedades, pero un costo considerable. Luego, el poliuretano posee una resaltante relación fuerza y densidad, sin embargo, presenta propiedades rígidas, junto a que con el tiempo se torna frágil. Por último, la fibra de vidrio es un material de bajo costo, alta resistencia prolongada y con capacidad de lograr formas complejas. Por ello, se elige emplear de fibra de vidrio para el material de los cascos, pues además de su bajo costo; su bajo peso, alta resistencia y fácil maniobrabilidad para la manufactura de formas, la convierte en el material usualmente usado en aplicaciones marinas de menor tamaño. Así, se escoge la fibra de vidrio de tipo E, debido a su buena resistencia a la corrosión, aislamiento eléctrico y adecuado para aplicaciones marinas, tal como se aprecia en la Tabla 4.2. Las propiedades del material se aprecian en la siguiente Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Tabla de características físicas y mecánicas de la fibra de vidrio tipo E  
Fuente: (AZOM)

Características	Nombre	Valor mínimo	Valor máximo
Propiedades físicas	Módulo de elasticidad ( <i>GPa</i> )	72	85
	Densidad ( <i>Mg/m<sup>3</sup></i> )	2.55	2.6
	Temperatura de transición vítrea ( <i>K</i> )	820	850
	Conductividad térmica ( <i>W/mK</i> )	1.2	1.35
Propiedades mecánicas	Módulo de ruptura ( <i>MPa</i> )	3300	3450
	Esfuerzo de compresión ( <i>MPa</i> )	4000	5000

El proceso de fabricación de la embarcación consiste básicamente en el empleo de resina de poliéster combinada con la fibra de vidrio en forma de hebras cortadas. Esta mezcla se coloca sobre el molde usualmente construido de madera, de tal manera que tome la forma de este. Así,

el proceso consiste en formar distintas capas, entre las cuales se colocan telas cosidas para aportar más rigidez.

Tabla 4.2 Propiedades ambientales de la fibra de vidrio tipo E  
Fuente: (AZOM)

Propiedad ambientales	(1 -5) Factores de resistencia
Agua de mar	5
Solventes orgánicos	5
Inflamabilidad	5
Agua fresca	5
Álcali fuerte	4
Ácido fuerte	5

#### 4.1.2 Cálculos de forma y disposición de cascos

Para el diseño de las dimensiones de los cascos, así como la disposición lateral y transversal, se siguen dos etapas de diseño basándose en investigaciones previas en el diseño de trimaran de desplazamiento para transbordadores (Zhang, 1997) y estudios del balanceo de barcos trimaran (Grafton, 2007). Tal como se aprecia en la Figura 4.1, la primera etapa se basa en recomendaciones de relaciones en dimensiones, para tener un arreglo preliminar y el cual debe evaluarse luego en cuanto estabilidad.

En primer lugar, el casco central debe cumplir con las recomendaciones de la relación entre longitud y ancho del casco ( $\frac{L}{B}$ ) entre 12 y 16, para poder reducir el consumo de energía para la propulsión; mientras que la relación de longitud con el volumen de desplazamiento debe ser alto. Por otro lado, es necesario comprobar, el comportamiento de desplazamiento a la velocidad mayor a 4 nudos según requerimientos.

Así, las dimensiones obtenidas, ver Tabla 4.3, tras pruebas de iteración para encajar con los requerimientos, pues la longitud no debía exceder de 3 m, por lo cual se elige 2.6 m. Verificando las recomendaciones entre el ancho y longitud, con un ancho de 0.3 m, se obtiene un radio de 13, cumpliendo con lo recomendado. Luego, se sugiere que el casco principal soporte la mayor parte de la carga, normalmente el 90% para los transbordos (Zhang, 1997). Sin embargo, en este caso según la disposición deseada de los laterales hacia la parte posterior longitudinalmente del casco central, se puede disminuir el porcentaje de carga a 80 %, pues se comprobó que la resistencia no se elevó drásticamente, ni se disminuyó la estabilidad.



Figura 4.1 Primera etapa de diseño de trimaran

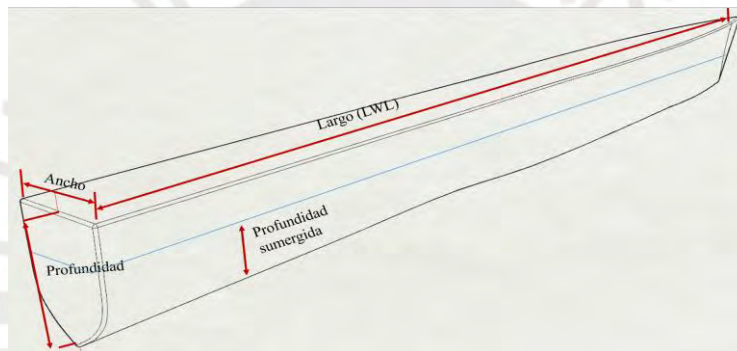


Figura 4.2 Gráfico de características principales de un casco

Tabla 4.3 Dimensiones del casco central

Parámetro	Valores
Longitud	2.6 m
Ancho	0.3 m
Profundidad sumergida	0.220 m
Profundidad total	0.266 m
Desplazamiento	70.628 kg
Coefficiente de bloque	0.599
Coefficiente prismático	0.759
Coefficiente de área media	0.789

Luego, empleando el *software* Rhinoceros se modeló el casco principal Figura 4.3 (b); basándose en las curvas de perfil de la Figura 4.3 (a), debido a que con este perfil se identificó un buen desempeño en resistencia y comportamiento en el mar (Chen et al. 2016).

Obteniéndose, el modelado mostrado en la Figura 4.3, en el cual se observa que las curvas traseras del casco han sido cambiadas, debido a que en esta zona se colocará el timón, así como para aumentar el coeficiente prismático, lo cual incrementa su capacidad de desplazar volumen, aunque esto supone teóricamente aumento de la fuerza resistiva.

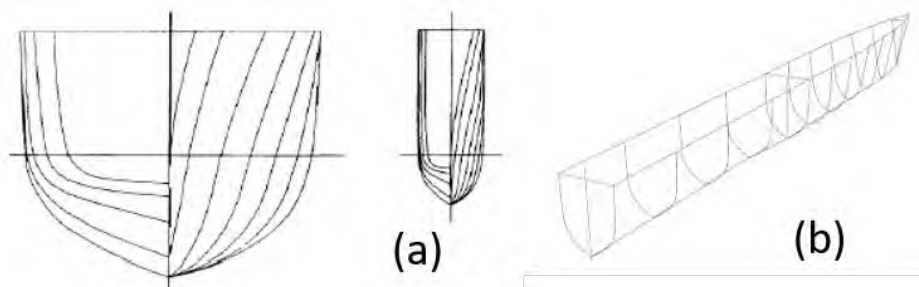


Figura 4.3 Curvas de diseño de casco principal y lateral (a) y estructura en Rhinoceros (b)  
Fuente: (JIZHENG y OTROS, 2016)

Luego, para el cálculo de la distancia del metacentro con el centro de gravedad ( $GM$ ) y verificar que sea mínimo 0, se realizan operaciones con el desplazamiento volumétrico deseado. El cual se encuentra relacionado con el coeficiente de bloque, y este a su vez es influenciado por el coeficiente de prismático ( $C_p$ ) y Coeficiente de área media ( $C_m$ ) los cuales son obtenidos del *software Polycad*. Luego, se utilizan las relaciones de las distancias del punto final del casco ( $K$ ), con el centro de flotabilidad ( $B$ ) y el centro de gravedad ( $G$ ), ver Anexos B.1.

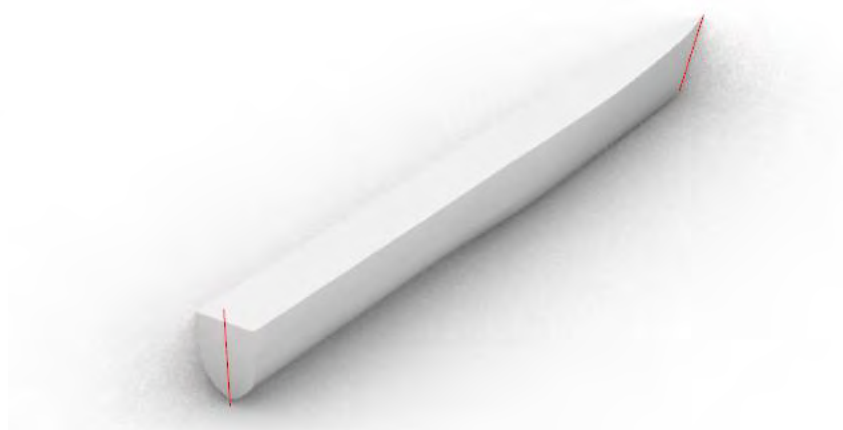


Figura 4.4 Modelado de casco principal en *Rhinoceros*

Luego, se pasa a dimensionar los cascos laterales, en base a la relación de longitud y ancho de casco recomendado entre 10 y 15, junto a la carga que debe desplazar y la longitud en relación con el largo del casco principal. Normalmente, se recomienda que la longitud inicial de los cascos laterales, se determinen mediante un estudio de flotabilidad después de una avería o inundación al casco principal y el 30% recaiga en el casco lateral, lo cual se aplica en el diseño de los compartimientos de embarcaciones grandes. Sin embargo, este es el caso de un vehículo

de dimensiones pequeñas, por ello, se prosigue a elegir el porcentaje de 60 % de la longitud del casco principal, para mantener un equilibrio de manera longitudinal con el arreglo a detallarse.



Figura 4.5 Modelado del casco lateral

Nuevamente, con la longitud, ancho y profundidad sumergida del casco, se prosigue a realizar la estabilidad por separado del casco lateral, ver Figura 4.5, siguiendo las mismas operaciones de Anexo B.1, pero con las dimensiones de la Tabla 4.4

Tabla 4.4 Dimensiones del casco lateral

Parámetro	Valores
Longitud	1.5 m
Ancho	0.150 m
Profundidad sumergida	0.05 m
Profundidad total	0.110 m
Desplazamiento másico	8.494 kg
Coefficiente de bloque	0.766
Coefficiente prismático	0.775
Coefficiente de área media	0.989

Luego, de obtenerse las dimensiones y parámetros mencionados en la Tabla 4.4, se prosigue a decidir la posición de los cascos laterales longitudinalmente. Así, se decide colocarlos con un desplazamiento 0 con referente a la parte trasera del casco principal, pues así el centro de gravedad se traslada para atrás, obteniéndose el beneficio del alejamiento del frente donde se ubicará el ecosonda y la subunidad sumergida no interrumpirá. Además, según estudios de la configuración de los cascos laterales en trimarán, se obtuvo que en la posición longitudinal mostrada en la Figura 4.6, presenta mejores características de resistencia, ya que a medida que se disminuye la distancia del desplazamiento longitudinal con respecto a la popa, la fuerza de resistencia se atenúa (MANU Y OTROS, 2013).

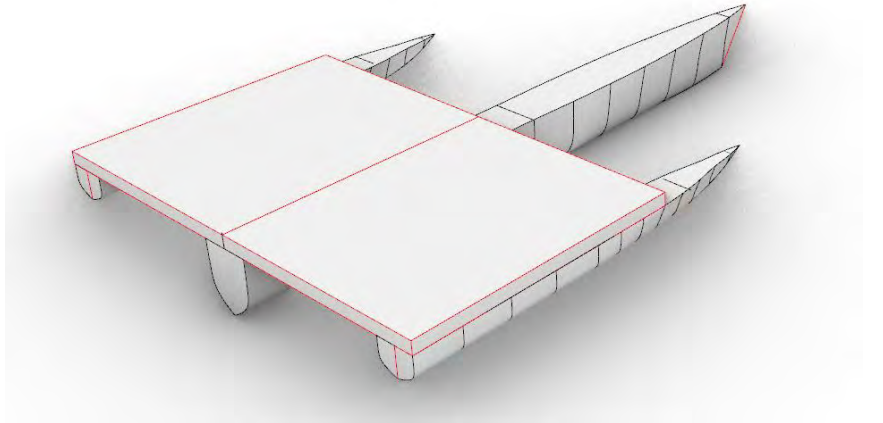


Figura 4.6 Modelado de trimaran

Por otro lado, la separación transversal entre los cascos laterales y el principal, se define según la magnitud de  $\underline{GM}_T$  del trimaran en relación con la magnitud del  $\underline{GM}_M$  de un monocasco equivalente con las mismas características de desplazamiento. Ver cálculos en Anexo B.2, donde se obtienen las dimensiones mostradas en la Tabla 4.5. Con ello, se halla el  $\underline{GM}_M$  del monocasco y se halla la relación entre este valor y el  $\underline{GM}_T$  del trimaran, ver Anexo B.2.

Tabla 4.5 Dimensiones de monocasco equivalente

Parámetro	Valores
Longitud	2.5 m
Ancho	0.420 m
Profundidad sumergida	0.09 m
Profundidad total	0.10 m
Desplazamiento	84 kg

Finalmente, para concluir la primera etapa de diseño, se debe colocar la superficie de unión que se observa encima de los cascos. La estructura de la unión se definirá en la sección 4.2.4, ya que su influencia en la estabilidad solo depende del área que se sumerge al existir algún ángulo de balanceo. Sin embargo, la longitud de la superficie debe ser igual al largo en que los cascos laterales tienen su máxima anchura (Zhang, 1997).

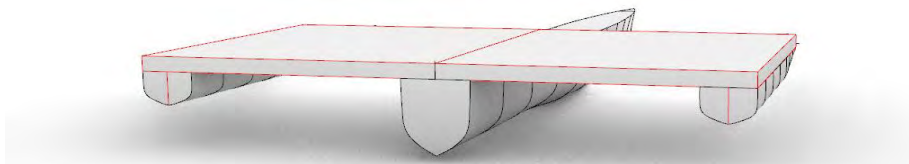


Figura 4.7 Modelado del trimaran, parte posterior.

La segunda etapa de diseño, se puede resumir en hacer un análisis y modificaciones de parámetros del arreglo para lograr una curva de estabilidad adecuada. Los cambios que influyeron en esta etapa fue en primer lugar la longitud el ancho del casco principal, junto a la

importante participación de la superficie de unión. Pues al simularse los ángulos de cabeceo, el área va tocando el nivel de agua, e incrementa así el ángulo máximo de estabilidad tal como se apreciará en la siguiente sección.

#### 4.1.3 Análisis de estabilidad del trimaran

El análisis de estabilidad consiste en evaluar el comportamiento de la embarcación en ángulos de cabeceo, para observar aquello, se grafica la distancia  $GZ$  vs el ángulo de cabeceo de la embarcación, tal como se observa en la Figura 4.8. Donde los parámetros importantes son el ángulo donde sucede el  $GZ$  máximo, y al área acumulado hasta ese lugar, pues el primero indica el ángulo de máximo brazo adrizante y a mayor área mayores valores de  $GZ$ .

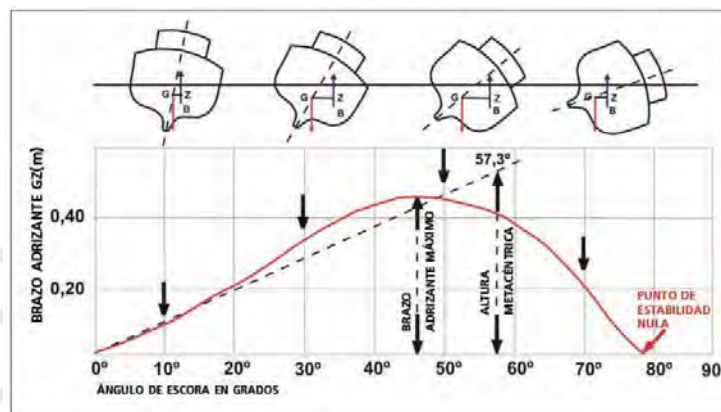


Figura 4.8 Teoría de análisis de estabilidad  
Fuente: (Fao, 2009)

Así, en el caso del trimaran debe cumplir con los requerimientos de estabilidad de la Organización Internacional Marítima (IMO) regulación A.749 dirigida para embarcación sin tripulantes y la cual establece los siguientes valores mínimos en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Tabla de valores IMO a evaluar

Parámetro	Valores del trimarán	IMO	¿Conforme?
Área entre los ángulos 0 – 30 °	135	$\geq 55$	Sí
Área entre los ángulos 0 -40 °	191	$\geq 90$	Sí
Área entre 30° y 40°	56.1	$\geq 30$	Sí
Ángulo donde ocurre el máximo	30	$\geq 25^\circ$	Sí

La gráfica obtenida es la observada en la Figura 4.9, donde la curva empieza con una pendiente aceptable, llega a su máximo en 30° y los valores del área se pueden observar en la Tabla 4.7 resultante del análisis.

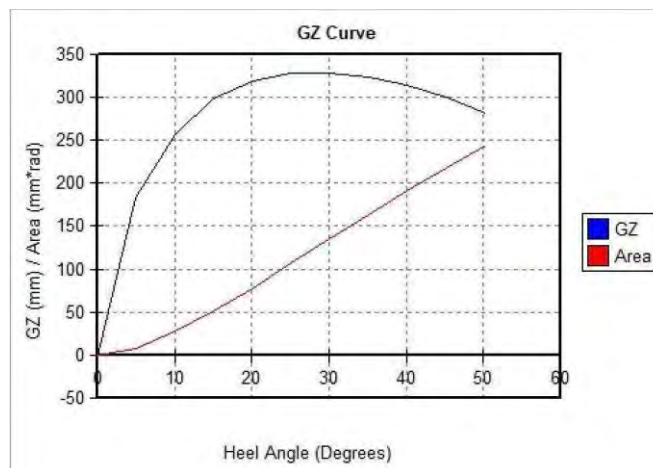


Figura 4.9 Diagrama de estabilidad del trimarán

Tabla 4.7 Tabla de resultados de curva

Heel [Deg]	GZ [mm]	GZ Area [mm*rad]	TR [mm]	Disp [kg]	Ta [mm]	Tf [mm]
0.0	-1.989	0.001	0.024	90.9	220.236	220.260
5.0	182.936	7.896	2.931	90.9	219.866	222.796
10.0	255.973	27.047	14.148	90.8	221.569	235.717
15.0	298.451	51.239	23.131	90.8	222.537	245.668
20.0	319.315	78.194	29.531	90.8	220.824	250.355
25.1	328.067	106.441	34.413	90.8	217.576	251.989
30.1	328.933	135.108	38.817	90.8	213.975	252.792
35.1	323.836	163.591	42.577	90.8	209.133	251.710
40.1	313.955	191.419	46.750	90.8	204.645	251.395
45.2	299.872	218.203	51.765	90.8	201.600	253.364
50.2	282.138	243.598	58.326	90.8	201.156	259.482

Luego de la comprobación de la estabilidad, se finaliza la etapa de dimensionamiento de los cascos. Sin embargo, se prosigue a escoger utensilios necesarios para el despliegue y recuperación del vehículo.

#### 4.1.4 Estructura de soporte

Para la estructura de unión de los cascos se emplean insertos en la fibra de vidrio de núcleos de madera, los cuales encajan con las vigas cuadradas tubulares. Primero, se evaluarán las cargas que soportan las vigas que unirán a los cascos, en el caso extremo de que se incline el trimarán hasta el punto que un casco queda expuesto. En el Anexo B.3 se observa el análisis de las fuerzas, determinando el punto crítico de esfuerzos en la unión con el casco principal con un peso del casco lateral de  $6\text{ kgf}$  y longitud  $800\text{ mm}$ . Obteniéndose como momento máximo de  $87.67\text{ Nm}$  y  $47.04\text{ Nm}$ . Luego, se evaluará el esfuerzo de flexión, empleando una viga de sección rectangular hueca, con dimensiones de  $50 \times 20\text{ mm}$  con grosor de  $2\text{ mm}$  y se determina el esfuerzo en cada caso. Así, se determina que con 3 vigas, cada una de ellas soportará un valor de  $17.3\text{ MPa}$ , lo cual equivale a tener un factor de seguridad de 5. Luego,

es necesario precisar que se emplea una superficie superior de PVC debido a que es necesario la introducción de la superficie para la estabilidad del vehículo.

Para realizar la unión se usarán tornillos entre el núcleo de madera y las vigas cuadradas. Por ello, se examinan las fuerzas a las que estarán sometidos los tornillos ubicados en el casco principal. A partir de estas equivalencias por unión de viga se decide emplear dos tornillos, cada uno de los cuales está sometido a una fuerza de tracción  $F_T = 23.86 N$  y un momento flector de  $M_F = 14 Nm$ . Luego, se verifica la unión atornillada eligiendo unos tornillos hexagonales inoxidables Monel 400 de 10 mm nominal, para lo cual se calculó un factor de seguridad de 1.3 , pues el esfuerzo máximo es de 550 MPa, ver Anexos B.3. Por último, se verifica que cuando exista la propulsión auxiliar, los pernos posean el suficiente ajuste para resistir el momento que los propulsores laterales causan. Empleno la fuerza de fricción, se calcula que  $M_{tornillo} \gg M_p$  .

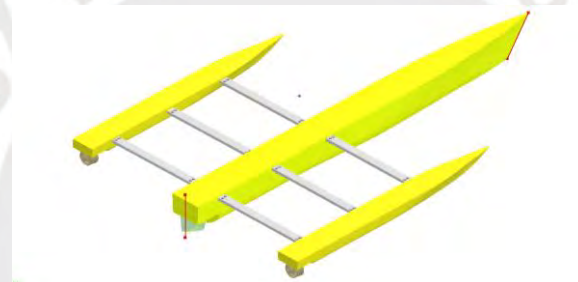


Figura 4.10 Modelo de unión de cascos con vigas e insertos

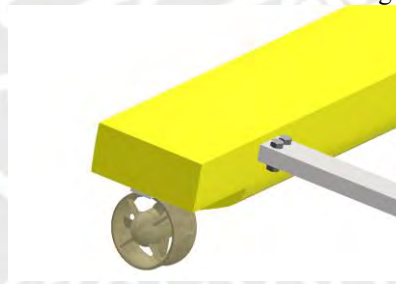


Figura 4.11 Acercamiento a unión atornillada de vigas e insertos

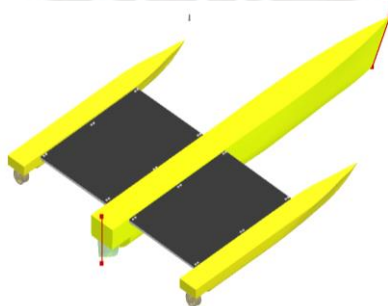


Figura 4.12 Unión final de cascos con vigas y encima superficie de PVC

#### 4.1.5 Manijas de izaje

En total se decide colocar 4 manijas de las cuales se tiene que repartir la carga. Con tornillos M5, se cumple con soportar una fuerza máxima mucho mayor que lo esperado, pues en caso extremo dos de las manijas soportarían todo el peso, y cada tornillo debe sostener 10.75 kg. Para la unión con los cascos, al tratarse de fibra de vidrio se necesita un elemento que permita la unión atornillada, por ello se emplearán tuercas remachables. Y, se genera una unión con las siguientes características:

- Tornillo avellanado: diámetro nominal M5 ( $D_2: 4.48mm$  y  $D_3: 4.09 mm$ ), diámetro de cabeza 10 mm
- Tuerca remachable con material de acero cincado, diámetro exterior de 7mm.
- Superficie de fibra de plástico con grosor de 5mm y grosor de plato 5 mm

Primero, se examina los esfuerzos en montaje. Luego, se obtiene la fuerza para el tornillo y las placas comprimidas, y se obtiene como esfuerzo resultante menor al máximo de fluencia, en la expresión (4.1)

$$\sigma_{eqM} = \sqrt{\sigma_M^2 + 3\tau_{t.trab}^2} \leq \sigma_F \Rightarrow 147 MPa \leq 235MPa . \quad (4.1)$$



Figura. 4.13 Placa de ojo oblonga y tornillo cabeza avellanada (APM HEXSEAL)  
Fuente: BIGAMART



Figura 4.14 Tuerca remachable  
Fuente: TECNOFIJACIONES



Figura 4.15 Sección de unión en modelado 3D

## 4.2 Timón

Tanto el tamaño como la forma del timón influyen en la maniobrabilidad de la embarcación, por lo cual la forma de este debe regirse a cumplir con los parámetros impuestos por IMO. Por lo cual, se debe examinar las siguientes características:

- Facilidad de evolución: capacidad de realizar una maniobra con un fuerte ángulo de cambio de rumbo. Lo cual es importante para el vehículo autónomo debido a que las rutas de navegación pueden ser forzadas a realizar maniobras con reducido espacio y gran ángulo de timón.
- Estabilidad de ruta: capacidad de mantener un vehículo en una ruta determinada accionando el timón. Lo cual es importante para el vehículo debido a la mediana travesía del recorrido en la zona delimitada.
- Facilidad de cambio de rumbo: es la facilidad para cambiar de ruta o trayectoria en el menor espacio posible y mayor rapidez posible. Lo cual significa de gran importancia para las maniobras para evitar una colisión.

### 4.2.1 Dimensionamiento del timón

Para el diseño del timón se necesitan los datos del casco principal de la Tabla 4.3, a partir del cual se calcula el área mínima del timón con la expresión de DNV, ver Anexo B.5. Luego, se define la altura del timón, siguiendo la recomendación de que las medidas sigan las condiciones que se observan en la Figura 4.16. Tras un proceso de iteración para reducir el torque, se escoge una altura de 125 mm.

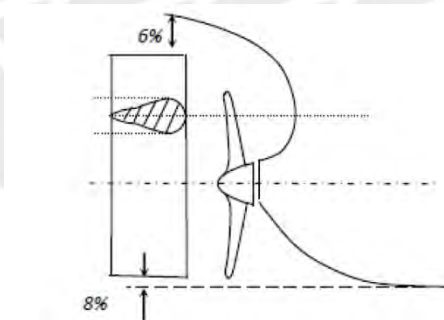


Figura 4.16 Esquema de recomendación de colocación timón  
Fuente: (Benedicto, 2016)

Así, se prosigue a definir el ancho del timón, empleando el área y la altura definida. Como resultado se obtiene un ancho de 160 mm. Obtenidos estos valores, se prosigue a definir el espesor del timón, a partir del valor de la relación de espesor y ancho ( $E$ ), el cual debe ser entre 0.15 a 0.23. Entre los cuales se escoge el valor de 0.25, para reducir el torque en la mecha, así se tiene  $t = 40 \text{ mm}$ .

Con las dimensiones se prosigue a determinar el centro de presiones en el timón en función del ángulo que ha girado el timón. Seguidamente, se obtiene la fuerza transversal y normal en el timón, con fines de obtener más adelante el par máximo.

#### *Área de compensación*

Para el área de compensación se diseña la distancia de colocación del eje ( $x_c$ ), a partir de un criterio de disminución de consumo de energía. Pues, el par de la mecha se define por (4.2), donde a medida que cambia el ángulo de giro del timón, se va cambiando el resultante par. Por lo cual se decide que para el ángulo de  $15^\circ$ , se torne 0. Se escoge este ángulo, pues es empleado con frecuencia para las rutas de navegación prolongada

$$Q = F_N \left( \frac{s}{c} - \frac{x_o}{c} \right). \quad (4.2)$$

#### *Perfil del Timón*

Para el perfil del timón se escoge el observado en la Figura 4.17, el perfil de tipo NACA, con tipo de NACA 0015. Obteniendo una paleta con forma mostrada en la Figura 4.18, empleando el software *Rhinoceros*.

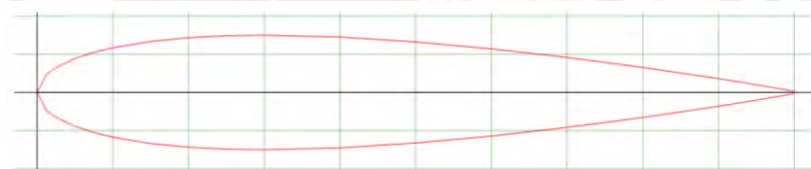


Figura 4.17 Perfil de ala  
Fuente: (BENEDICTO, 2016)

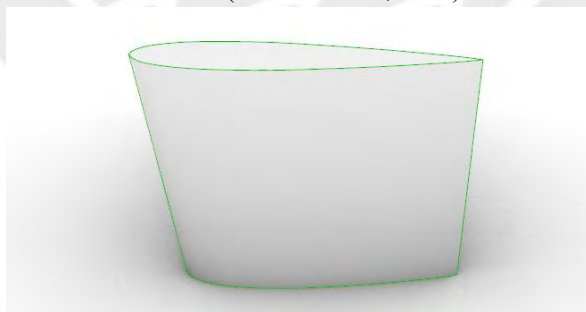


Figura 4.18 Modelado de paleta

#### *Diámetro de la mecha*

Según la norma DNV, se determina el diámetro de la mecha dentro de la superficie del timón, empleando el par máximo soportado por el timón, ver Anexo B.5. Y se obtiene como diámetro de la mecha dentro del timón un valor de 7.52 mm, pero se elige 8 mm. Al tratarse de un timón compensado y colgante, se escoge las siguientes dimensiones mostradas en la Tabla 4.8. Así,

se prosigue a calcular el diámetro de la mecha antes del timón y se obtiene un valor de 8.17 mm, lo cual se aproximó a 9 mm.

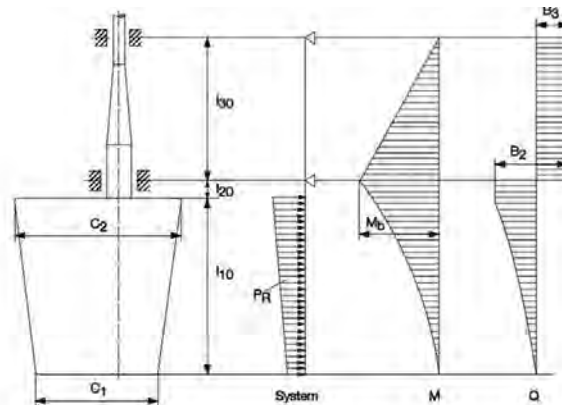


Figura 4.19 Diagrama de fuerzas y momentos de timón  
Fuente: Norma DNV

Tabla 4.8 Dimensiones de timón

C	160
110	125
120	10
130	76
c1	119.5
c2	200.5

#### 4.2.2 Comprobación de maniobrabilidad

Luego, se prosigue a evaluar la maniobrabilidad con las dimensiones escogidas.

*Facilidad de evolución:* Esta capacidad se evalúa mediante la expresión (4.3)

$$\frac{D_G}{L_{pp}} < 7.2 - 5C_B \quad (4.3)$$

Seguidamente, se evalúa el valor de la relación entre el diámetro de giro y la longitud del casco, ver Anexo B.5. Se obtiene el valor de  $\frac{D_G}{L_{pp}} = 1.13 \ll 4.2$ . Lo cual comprueba que cumple con el criterio de facilidad de evolución.

*Facilidad de gobierno:* Para esta capacidad se toma el criterio de Gertler, el cual determina el ancho del ciclo de histéresis y considera que el valor de la anchura máxima del ciclo debe ser de  $4^\circ$ . La expresión que lo define es la siguiente:

$$a = 18.12 - \frac{46.43}{T_m} < 4^\circ, \quad (4.4)$$

Donde  $T_m$  es el índice de Nomoto, por lo que operando en función del índice, se puede plantear la desigualdad (4.5),

$$\frac{1}{T_m} > 0.305. \quad (4.5)$$

Lo cual se denomina índice representativo de la rapidez de respuesta de la embarcación al ciclo de histéresis. Por lo cual se debe determinar el índice de Nomoto, ver Anexos B.5. Finalmente, se obtiene el valor de  $\frac{1}{T_m} = 0.328 > 0.305$ , con el cual se verifica, la capacidad de facilidad de gobierno.

*Facilidad de cambio de rumbo:* La maniobra del zigzag inicial se puede cuantificar mediante el número  $P$  de norrbín, el cual representa el ángulo girado por unidad de ángulo del timón empleado una vez navegada una eslora. En Anexos B.5, se explica el cálculo realizado y se observa un número norrbín de 0.81. El cual supera la valla y cumple con el criterio de IMO MSC 137 (76).

#### 4.2.3 Selección de servomotor

Con la fuerza del par máximo en la mecha se puede proseguir a calcular la potencia requerida para el servomotor que acciona el timón. En primer lugar, se plantea la velocidad angular de movimiento requerido para las maniobras, mediante la expresión (4.6), en la cual los ángulos de operación son de  $-35^\circ$  a  $35^\circ$  mientras que el tiempo para hacer el cambio será de 0.3 segundos.

$$\omega = \frac{(\theta_F - \theta_I)}{t} = \frac{(35 - (-35))}{0,3} = 3.05 \frac{rad}{s} \quad (4.6)$$

Luego, la potencia del servomotor queda definido con la expresión (4.7)

$$P_{servo} = \frac{Q_{max} w}{0.6} \quad (4.7)$$

donde  $Q_{max}$  es el par de mecha máximo,  $w$  es la velocidad angular de giro previamente determinado, y el rendimiento se coloca como 0.6. Obteniendo una potencia de 32.35W. Luego, con un factor de seguridad se determina que se necesita una potencia de 48.53W, con un torque máximo de 10 Nm.

Por lo cual, se emplea el servomotor i0060 debido a que posee un torque máximo de 11.3 Nm. Además, la velocidad angular es adecuada  $1.5s/90^\circ$ . Para el control del servomotor, el producto

contiene en el interior el controlador Jrk 21xv3, ver Figura 4.20, al que se le abastece de 12 V y se le proporciona una señal pwm.

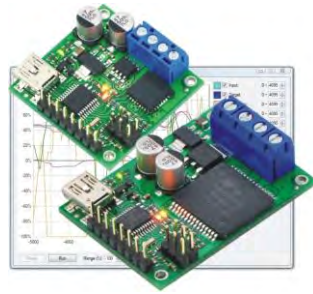


Figura 4.20 Driver de servomotor  
Fuente: Pololu

#### *Acople con casco principal*

El timón debe acoplarse mediante dos apoyos, tal como se observa en la Figura 4.21, por lo cual se diseña un acople inferior con uniones atornilladas que se unen al casco e incluye o-rings para proteger la filtración de agua, ver Anexo B.7.

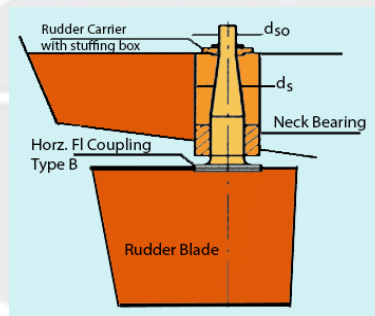


Figura 4.21 Diagrama de acoples  
Fuente: MarineInsight

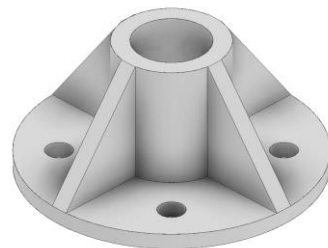


Figura 4.22 Modelado de apoyo inferior

#### *Soporte superior cargador*

En Anexo B.7, se expone el diseño del soporte superior acoplado con bocinas de Nylon, material seleccionado por tratarse de fuerzas bajas. Además, de una manga que acompaña al eje por el tramo de los apoyos y de material aleación de aluminio anodizado.



Figura 4.23 Sección de modelado de soporte superior acoplado

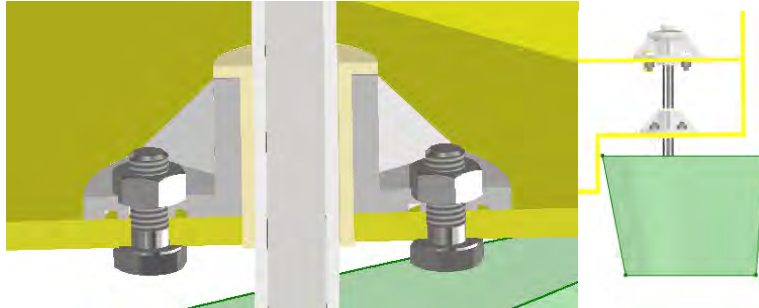


Figura 4.24 Sección de soporte inferior acoplado

### 4.3 Mecanismo de propulsión

#### 4.3.1 Cálculo de fuerza de resistencia

Para poder realizar el diseño de la propulsión base de olas como la auxiliar, se debe calcular la magnitud del empuje que estos deben generar para poder mover la embarcación. Por lo cual se prosigue a realizar el DCL del vehículo trimaran, el cual se aprecia en la Figura 4.25. Así, la suma de fuerzas se describe en la expresión (4.8)

$$\sum F_x = ma \Rightarrow F_p = \frac{ma - R_t}{2} \quad (4.8)$$

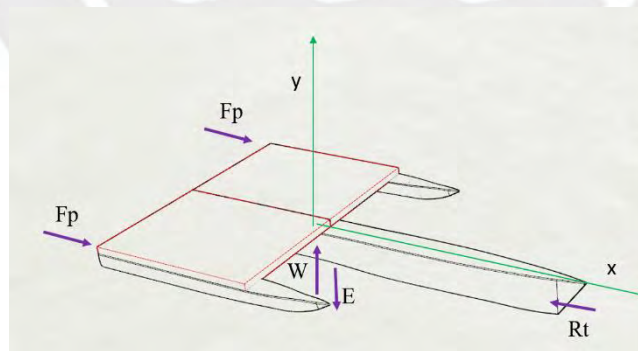


Figura 4.25 DCL del trimaran

Donde la aceleración a evaluar es de valor  $0.5 \frac{m}{s^2}$ , y la masa del vehículo se estima de 86 kg. Entonces se prosigue a calcular la fuerza de resistencia mediante el método ITTC1957 del comité internacional de Tanques de Remolque (ITTC). Para determinar esta fuerza según la velocidad de movimiento se debe examinar el casco principal y el casco lateral. La fuerza de resistencia se puede determinar con la expresión (4.9).

$$C_T = C_F + C_A + C_{AA} + C_R = \frac{R_T}{\frac{1}{2}\rho sV^2} \quad (4.9)$$

donde  $C_T$  es el coeficiente total de resistencia, el cual se compone de los siguientes coeficiente,  $C_F$  : coeficiente friccional de resistencia,  $C_A$ : coeficiente de resistencia incremental,  $C_{AA}$ : coeficiente de resistencia del aire, y  $C_R$ : coeficiente de resistencia residual. Además,  $R_T$  es la fuerza de resistencia equivalente,  $\rho$  la densidad del agua ,  $s$  el área del agua sumergida, y  $V$  la velocidad del vehículo. Por lo cual, se prosigue a realizar el cálculo para el casco principal. Del *software* Polycad, se obtienen los datos de la Tabla 4.9, donde se presenta las dimensiones del casco principal y características importantes para la aproximación de resistencia del casco.

Tabla 4.9. Características hidrostáticas de casco principal

Datos hidrostáticos	Valor
Longitud ( $L_{wl}$ )	2629.91 mm
Ancho ( $B$ )	193 mm
Profundidad sumergida ( $T$ )	220 mm
Profundidad total ( $D$ )	265.3 mm
Desplazamiento total del casco	68.96 kg
Área de superficie sumergida ( $S$ )	1244223.927 mm <sup>2</sup>
Coficiente prismática ( $C_p$ )	0.759

Primero, se calcula el coeficiente friccional de resistencia  $C_F = 0.003936$  , ver Anexos B.8. Luego, se prosigue con el cálculo del coeficiente de resistencia incremental  $C_A = -0.00068$ . Seguidamente, se halla el coeficiente de resistencia del aire ( $C_{AA}$ ) donde se considera el área frontal que enfrenta el aire, designando una altura encima del nivel del casco de 0.4 m, para la estructura para los paneles solares.

Así, se obtiene  $C_{AA}$  con un valor de  $7.09 * 10^{-6}$ . Por último, se prosigue a realizar el cálculo del coeficiente de resistencia residual ( $C_R$ ), el cual se conforma por un valor de diagrama  $C_{R,diagram}$  y correcciones que hacen referencia a la forma del casco  $C_{R,form}$ ; y corrección por la relación entre ancho y profundidad  $C_{R,B/T}$ . Finalmente, el valor  $C_R$  este resulta el valor de 0.00064.

$$C_R = C_{R,diagram} + \Delta C_{R,B/T} + C_{R,form}$$

Por último, el valor del coeficiente de resistencia total se determina reemplazando los valores hallados en los pasos previos, obteniendo el valor de 0.0039, del cual se obtiene el valor de la

fuerza de resistencia total del casco en la velocidad de 1 m/s, el cual es de 2.49 N. Este proceso se repite para las diferentes velocidades para el casco principal, cuyos resultados se encuentran en Anexos B.9.

Luego, se sigue el mismo procedimiento para el casco lateral, pero con las propiedades hidrostáticas propias del casco lateral diseñado, las cuales se observan en la Tabla 4.10. Obteniendo los valores en Anexos B.9. A partir de los valores hallados se compone una sola fuerza de resistencia a partir de la expresión (4.10). Finalmente, la fuerza de empuje según la velocidad del trimaran se encuentra detallada en Anexos.

$$R_{Total} = R_{principal} + 2R_{lateral} \quad (4.10)$$

Tabla 4.10 Características de casco lateral

Datos hidroestáticos	Valor
Longitud ( $L_{wl}$ )	1488.606 mm
Ancho ( $B$ )	152.35 mm
Profundidad sumergida ( $T$ )	48 mm
Profundidad total ( $D$ )	161 mm
Desplazamiento total del casco	8.494 kg
Area de superficie sumergida ( $S$ )	281077.495 mm <sup>2</sup>
Coefficiente prismática ( $C_p$ )	0.775

Tras el método de aproximación de la fuerza de resistencia, se obtienen las siguientes gráficas de fuerza de resistencia en Figura 4.38. A partir de las cuales se obtiene la fuerza según la velocidad a funcionar, la cual, según los requerimientos, la máxima velocidad será de 5 nudos, lo que equivale a 2.57 m/s y se necesitaría aproximadamente 5kgf. Sin embargo, cabe resaltar que esta fuerza es la necesaria para partir del reposo y alcanzar la velocidad máxima planificada, lo cual excede a la que debe emplearse pues estará en movimiento por el movimiento de olas. Además, se parte a velocidades menores de la máxima normalmente.

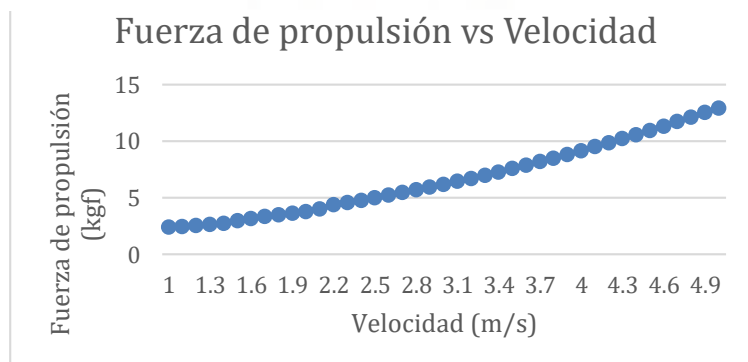


Figura 4.26 Fuerza de resistencia en kgf

### 4.3.2 Selección de material y perfil de hidroala

Para la propulsión a base de la oscilación de hidroalas, normalmente se emplean perfiles NACA simétricos, los cuales se delimitan en ciertos ángulos de oscilación para impedir la pérdida de energía en los movimientos de oscilación vertical y cabeceo, de los cuales se obtiene la propulsión. En la Figura 4.26, se presenta el comportamiento de la hidroala frente al ciclo de la ola, donde la etapa de transmisión de la fuerza de propulsión sucede en los tiempos  $[t_1, t_2]$  y  $[t_3, t_4]$ .

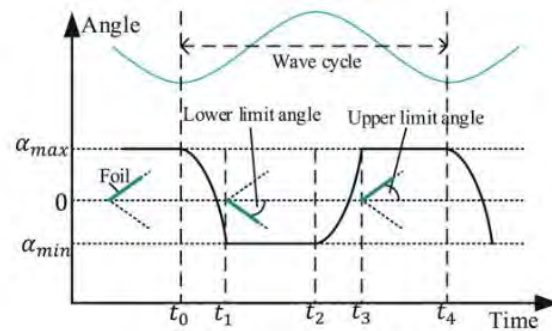


Figura 4.27 Diagrama del movimiento de hidroala en el tiempo  
Fuente: (GAO, 2022)

Sin embargo, la hidroala a emplearse tendrá una forma asimétrica y con resultados de mayor generación de fuerza de propulsión en las mismas condiciones que los perfiles tradicionales (GAO, 2022). Basándose en la forma en que las aves doblan sus alas durante el vuelo, tal como se aprecia en la Figura 4.27 (D), la hidroala presenta las fuerzas señaladas y el desenvolvimiento mediante fórmulas a diferentes parámetros se encuentra en la Figura 4.27.

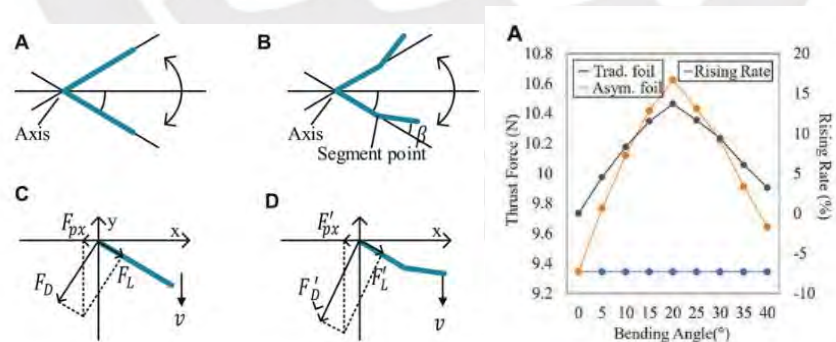


Figura 4.28 Gráfico de propulsión frente a inclinación de hidroala  
Fuente: (Gao, 2022)

Según GAO, los parámetros óptimos para la hidroala asimétrica, bajo dimensiones de longitud de cuerda 18 cm, grosor 1 cm, y extensión de 100 cm, son un ángulo inferior de  $45^{\circ}$ , un segmento de radio de  $11/18$  con una inclinación angular de  $25^{\circ}$  y un límite superior angular  $34^{\circ}$ . Pues, alcanzaron los más altos resultados de hasta 31.76% más en fuerza de propulsión y

10.08% menores pérdidas de propulsión. Así, como la longitud de cuerda de la hidroala a emplearse es de 12 cm, se determina la inclinación en 7.33 cm, ver Figura 4.28.



Figura 4.29 Modelado de hidroala

En el caso del material para las hidroalas, mayormente se emplea aluminio o fibra de carbono. El segundo presenta propiedades de alta rigidez, y resistencia, por lo cual se recomienda para usos agresivos de hidroalas como saltos, sin embargo, es frágil al impacto y de mayor costo. Por otro lado, el aluminio es otra opción por su bajo costo y propiedades mecánicas, pero posee un mayor peso y mayor exposición a la corrosión. Por otro lado, el cloruro de polivinilo (PVC) es un material empleado para obtener hidroalas flexibles, las cuales dotan de mayor capacidad de generación de propulsión por su interacción con el fluido (Harwood, 2016).

Basándose en las simulaciones y experimentos investigados (DU, 2019), para la longitud de la hidroala, se escoge con un valor de 12 cm con grosor de 10 mm. Luego, el espacio entre ellas, se determina con la desigualdad (4.11)

$$0.1 * c = \text{espacio entre par de hidroalas}, \quad (4.11)$$

pues a mayor proximidad entre alas, se puede aprovechar del fluido y generar mayor fuerza de propulsión (DU, 2019). Por lo tanto, el espaciado será de 12 mm. Luego, sobre el número de hidroalas, previamente se conoce que a medida que se incrementa el número de hidroalas, se aumenta la capacidad de propulsión a base de olas, por lo tanto se sigue la consideración que el número de hidroalas sea de 6.

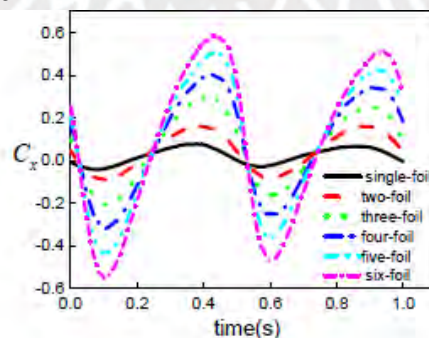


Figura 4.30 Coeficiente de propulsión en función el número de hidroalas  
Fuente: (Du, 2019)

Luego, se determinó la longitud de la hidroala con un valor de 60 cm. Mientras que el valor del resorte que poseerá la hidroala, se determina como valor deseable 5000 N/m, ya que con este valor se puede obtener una mejor propulsión, basándose en el análisis hidrodinámico observado en la Figuras 4.30 (MA, 2022). Con respecto al resorte, que necesita la hidroala se elige el resorte con una longitud de 1.0 in, y un valor de su constante de 28.2 lb/in, lo cual fue lo más cercano a lo deseado.

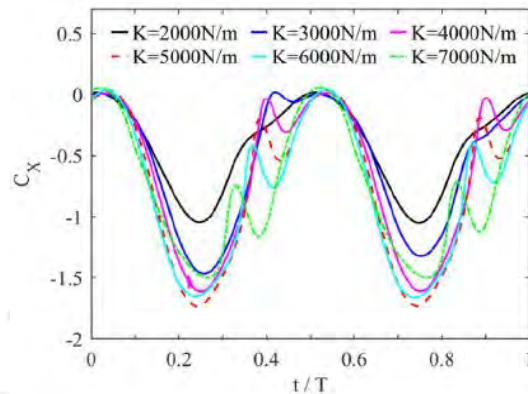


Figura 4.31 Diagrama de coeficiente de propulsión según constante de resorte  
Fuente: (Li, 2022)



Figura 4.32 Resorte de extensión 1 in

### 4.3.3 Cálculos de subunidad sumergida

Según las condiciones energéticas de las olas en Lambayeque, el periodo energético promedio anual es de 12.5 segundos, y la altura promedio es de 1.1 m. En la Figura 4.32, se puede observar las velocidades que llega alcanzar el vehículo, según la variación de altura de la ola y el tamaño del periodo. Aquella gráfica demuestra que, según las condiciones descritas de Lambayeque, se espera una velocidad aproximada de 0,2 m/s, pues la considerable altura de la ola compensa el largo periodo existente.

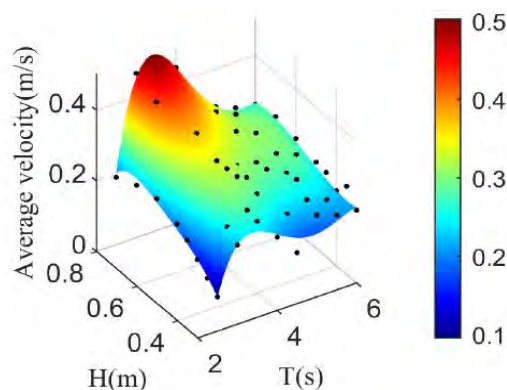


Figura 4.33 Velocidad alcanzado según características de las olas  
Fuente: (Li, 2022)

Cada hidroala presentará un eje del cual pivotar, mientras el otro será de guía para la limitación de ángulo de oscilación. Por ello, se verificará el eje de pivote, para lo cual primero se examinará la fuerza aproximada que deberá soportar, a partir de la examinación de las fuerzas en la hidroala. En la Figura 4.33 se puede apreciar las fuerzas que interactúan en ella, donde  $F_S$  es la del resorte,  $F_D$ , es la fuerza de arrastre, y  $F_L$  la fuerza de elevación. De estas se genera una fuerza en el eje x e y equivalente, mediante la expresión (4.12)

$$\begin{aligned} F_X &= -F_L \sin(\theta + \alpha) + F_D \cos(\theta + \alpha) + F_S \cos(\gamma) + F_{AX}, y \\ F_Y &= \pm(-F_L \cos(\theta + \alpha) - F_D \sin(\theta + \alpha) + F_S \sin(\gamma) + F_{AY}). \end{aligned} \quad (4.12)$$

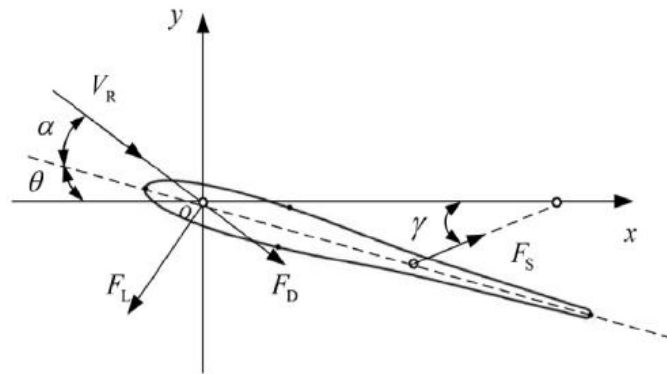


Figura 4.34 Diagrama de fuerza de hidroala  
Fuente: (Li, 2022)

Luego, para determinar los valores de las fuerzas  $F_X$  y  $F_Y$ , se determina emplear los coeficiente en x y y que están en relación con las dimensiones y velocidad del fluido que entra, tal como se aprecia en la expresión (4.13)

$$C_X = \frac{F_X}{0.5\rho U_\infty bc} \text{ y } C_Y = \frac{F_Y}{0.5\rho U_\infty bc}, \quad (4.13)$$

los cuales dividiéndolos se puede encontrar una relación, a partir de los valores máximos en el mismo tiempo, el cual se da en cuarto de un periodo. Para ello, se realiza una simulación en ANSYS FLUENT, en la cual se modela una hidroala con un perfilamiento de NACA0012, longitud de cuerda 12 cm y grosor 10 mm. Se construye un entorno de fluido de agua separados en dos secciones, ver Figura 4.34. Donde la sección B lleva una malla estática y la A dinámica. Así, al contorno de la zona estática se le define una función de movimiento con altura 1.1 m y periodo 0.833 Hz.

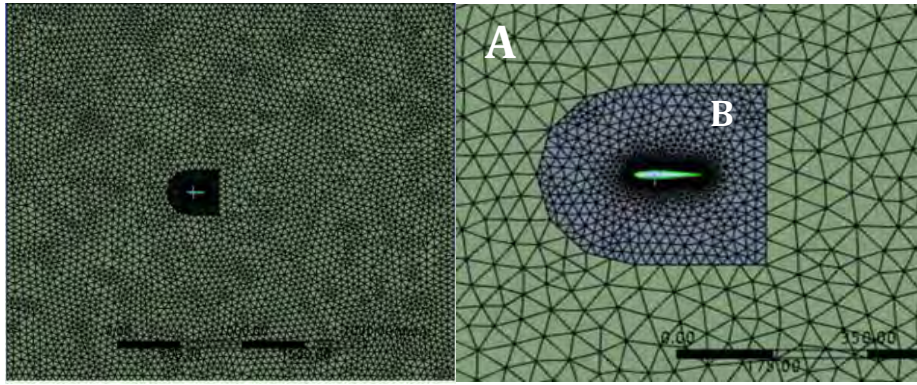


Figura 4.35 Estructura de Mesh en Ansys Fluent

Se simuló medio periodo de movimiento de olas (6 segundos), y se graficó el coeficiente en x ( $C_d$ ) y el coeficiente en y ( $C_l$ ), ver Figura 4.36. Eligiendo el pico del coeficiente, para  $t \approx 1.7s$  aproximadamente, se tienen los valores  $C_d \approx 0.18$  y  $C_l \approx 0.43$ , obteniéndose una relación de  $\frac{C_l}{C_d} = 2.38$ .

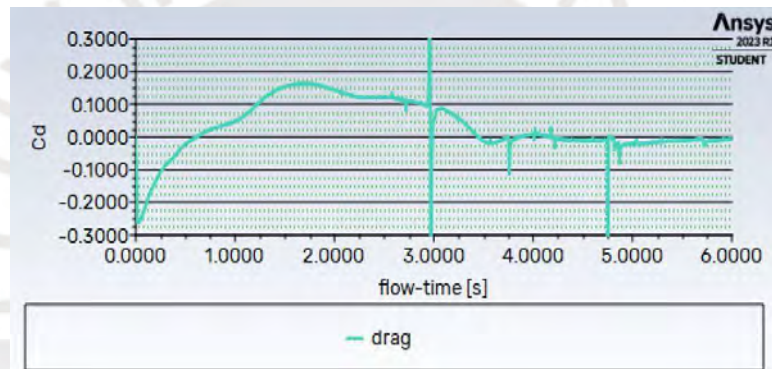


Figura 4.36 Coeficiente  $C_d$

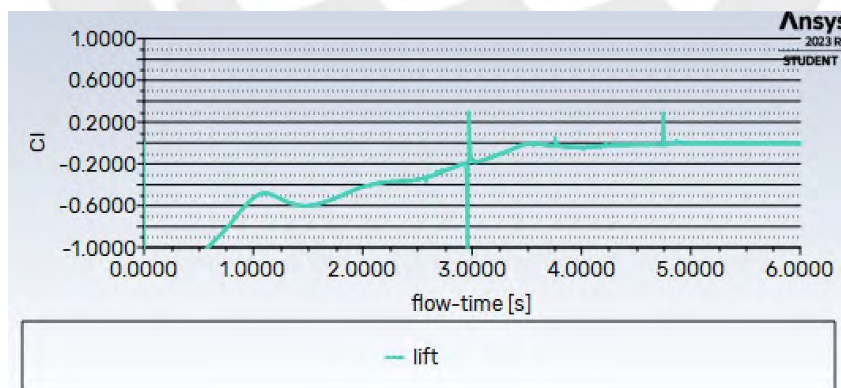


Figura 4.37 Coeficiente  $C_l$

Luego, se obtiene la fuerza de propulsión ( $F_x$ ) que experimenta la hidroala, ver figura 4.37. Donde la fuerza máxima en el medio periodo de ola, es de  $F_x = 3.2 N$ , y por la igualdad de coeficientes encontrada previamente se determina una fuerza en el eje y,  $F_y = 7.6 N$ .

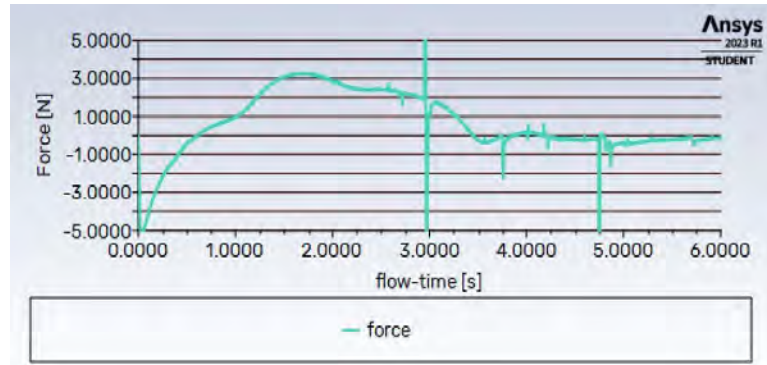


Figura 4.38 Gráfico de Fuerza en  $x$  vs tiempo

Luego, obtenidas las magnitudes aproximadas de las hidroalas, se verifica la resistencia del eje principal pivote, ver Anexos B.10. Así, se obtiene un factor de seguridad con la expresión (4.14), y queda verificado que es suficiente el pasador de 7 mm de acero inoxidable 316.

$$FS = \frac{\sigma_{lim}}{\sigma_{eq}} = \frac{270}{91.36} = 2.63, \quad (4.14)$$

Luego, la conexión entre la hidroala de PVC con el eje pivote, se realizará con dos tornillos ciegos M3. Los cuales se verificaron sometidos a momento de flexión debidos al peso de la hidroala. Y la fuerza máxima de montaje por la unión atornillada, con un valor de 1046 N. Luego, se obtiene un esfuerzo equivalente de 371 MPa, y se comprueba un FS de 1.14.



Figura 4.39 Modelado de hidroala

Finalmente, se construye el marco que poseerá las guías para que oscile la hidroala, junto con un agujero para que sostenga el elemento que sostendrá el arreglo de hidrófonos para la detección de cetáceos que se describe en el capítulo VI.



Figura 4.40 Modelado de Marco de subunidad sumergida

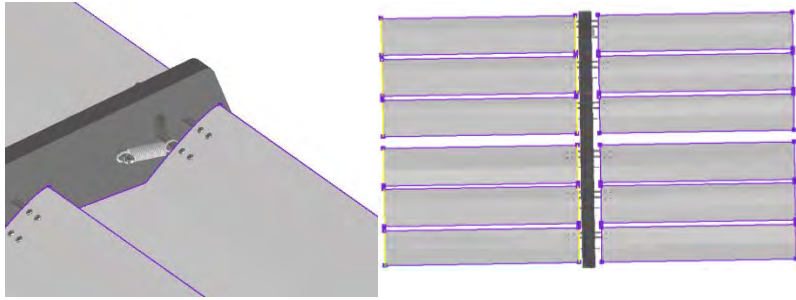


Figura 4.41 Resorte entre eje en ranura y un eje soporte (izquierda) y vista superior de subunidad (derecha)

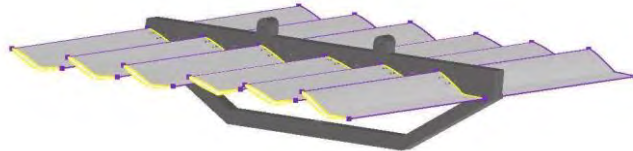


Figura 4.42 Vista isométrica de subunidad sumergida

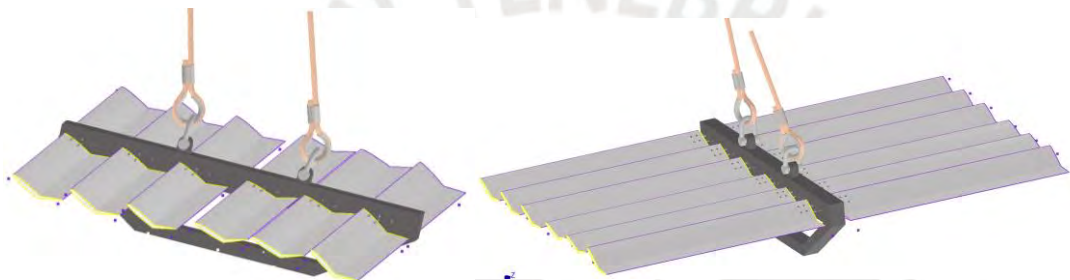


Figura 4.43 Modelado final de subunidad sumergida con estrobo

Para la unión con el casco principal de la superficie se emplearán dos placas de ojo oblonga, al cual se le anexará la cuerda que se conecta con la subunidad sumergida. Estos deberán soportar en caso extremo el peso de toda la subunidad junto el arreglo de hidrófonos, lo cual es el caso de la recuperación del vehículo, por lo tanto, el peso máximo a que se someterá es de la subunidad con un total aproximado de 8 kg, mientras el arreglo en completo con 7 kg, dando un total de 15 kg.

Por lo tanto, cada tornillo deberá tolerar la mitad del peso de la subunidad sumergida, lo cual se determina como  $W_S = 73.5 N$ . Luego, se analiza la unión atornillada, calculando el esfuerzo equivalente, el cual queda determinado por el valor de  $\sigma_{eq} = 286.6 MPa$ , y se verifica un factor de seguridad de 1.67, ver Anexo B.10. Para prevenir el ingreso de agua en el casco, se debe emplear un O-ring, para lo cual se calcula el diámetro interior ( $DI_{O-ring}$ ), empleando la expresión (4.15), se despeja el valor de  $DI_{O-ring}$ , mientras que para el diámetro interior del surco ( $DI_{surco}$ ) se decide un valor de 9 mm. Por consiguiente, para un apriete de 2% se obtiene un  $DI_{O-ring} = 8.82 mm$

$$\text{Apretamiento}(\%) = \frac{DI_{\text{surco}} - DI_{O\text{-ring}}}{DI_{O\text{-ring}}} * 100, 1\% \text{ a } 5\% \quad (4.15)$$

$$\text{Compresión}(\%) = \frac{CS_{O\text{-ring}} - \text{Profundidad}}{CS_{O\text{-ring}}} * 100; 18\% - 25\% \quad (4.16)$$

A partir de este valor, se elige el O-ring con las dimensiones de la Figura 4.43 donde también se define el diámetro exterior del surco. Mientras la profundidad de 19% se obtiene 1.52 mm.

Size	CS (IN)	ID (IN)	OD (IN)	CS (MM)	ID (MM)	OD (MM)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="8.89"/>	<input type="text"/>
1.88X8.89	0.074	0.350	0.498	1.88	8.89	12.65

Figura 4.44 O-ring seleccionado  
Fuente: Marcorubber

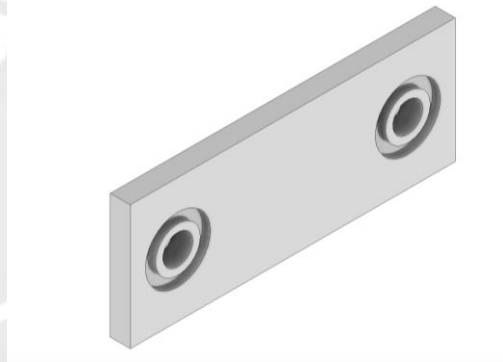


Figura 4.45 Modelado de placa para unión

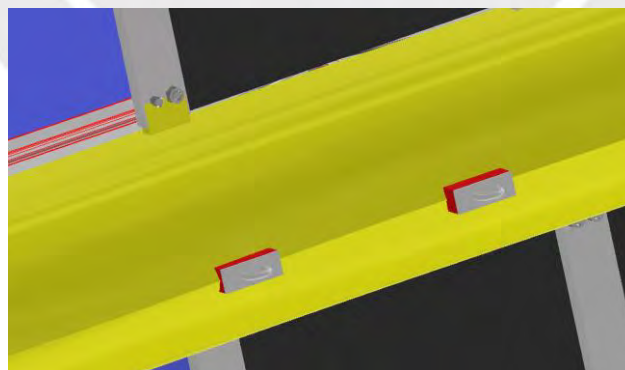


Figura 4.46 Placas O blong en casco principal

#### 4.3.4 Selección de propulsión auxiliar

En Anexos B.11, se la evaluación de los actuadores comerciales que deben cumplir con el requerimiento de ser tener la capacidad para un empuje de  $5 * 1.2 = 6\text{kgf}$ , incluyendo un factor de seguridad de 1.2, para la elección de propulsores. Finalmente, se elige el propulsor W30 de Cube mars al cumplir con los requerimientos de empuje (6.7-7.7 kgf), ser de bajo costo y

desarrollado con material adecuado para aplicaciones marinas. Además, incluye un controlador de velocidad (ESC), el cual recibe las entradas mediante el empleo de PWM y es posible realizar el control por medio de controlador o procesador con salida digital.



Figura 4.47 Propulsor W30  
Fuente: (Cubemars)

### Montaje de propulsor

Es necesario realizar un soporte para asegurar el correcto acople del propulsor con la parte inferior del casco lateral. Tal como se aprecia en la Figura 4.47, el propulsor proporciona cuatro roscas para realizar el acople, los cuales se usarán para asegurarse al acople, sin embargo la unión con el casco será mediante dos tornillos externos. Para lo cual, se verificó si soportará la cizalladura, pues trabajará críticamente en este tipo de fuerza junto al empleo de O-rings, ver Anexos B.11.

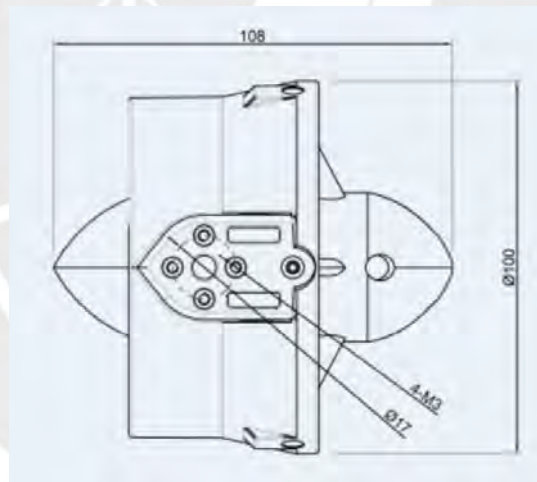


Figura 4.48 Bosquejo de propulsor  
Fuente: (Cubemars)

Para determinar el grosor, se evalúa rápidamente las zonas de aplastamiento del soporte, el cual será de material Aluminio 5083, ya que es adecuado para el entorno marino.

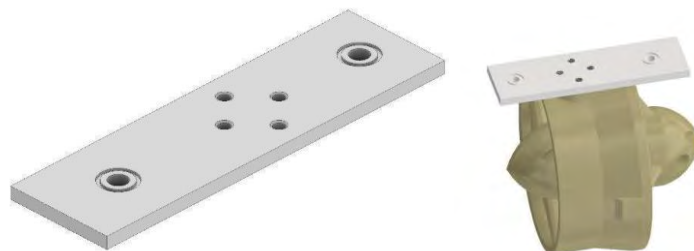


Figura 4.49 Acople de propulsor a casco lateral

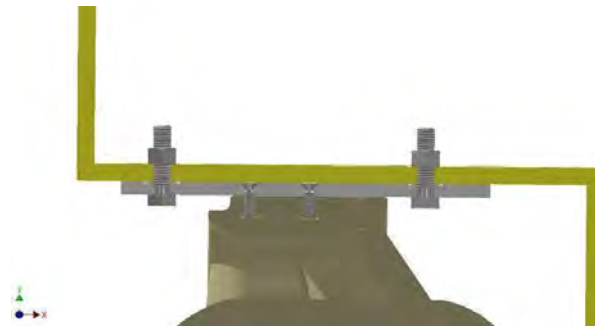


Figura 4.50 Vista de sección



Figura 4.51 Vista del ensamble en casco lateral

#### 4.4 Estructura de soporte para paneles

La estructura de soporte de los dos paneles solares seleccionados en el capítulo VII debe posicionarse en el ángulo óptimo determinado de  $17^\circ$ , junto a soportar el componente GPS compass y la luz de navegación del subsistema de navegación.

##### 4.4.1 Cálculos de estructura

Para la estructura se analiza el lado donde soportará las mayores cargas, en este caso se analiza la viga superior que soportará parte del panel y de la superficie de unión entre estructuras. Pues según el desarrollo del subsistema de energía, se necesita una inclinación de  $17^\circ$  para el mayor aprovechamiento de la energía solar. Por ello, se analizó la flexión de esta parte ver Anexos B.12. Considerando la inercia de un perfil de aluminio anodizado con medidas de 20x20x2 mm. Luego, se verificó el pandeo de la parte vertical que sostendrá principalmente la superficie superior y unirá con el casco principal la estructura de los paneles.

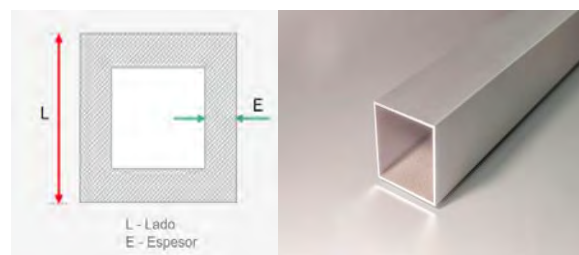


Figura 4.52 Perfil de estructura



Figura 4.53 Modelado de estructura de paneles solares



Figura 4.54 Estructura de paneles sobre cascos

#### 4.4.2 Análisis de flexión

A continuación, se presenta una simulación de las fuerzas que soportaría la estructura, las cuales se tratan del peso de los paneles junto con la tapa en la parte superior, la cual albergará el *gps compass* y la luz de navegación elegidos en el capítulo V. Ambos se colocaron como fuerzas distribuidas para las vigas longitudinales que forman la superficie superior y diagonales que soportan los paneles. En la Figura 4.54, se observa el resultado de los esfuerzos normales presentes en las vigas, de los cuales el máximo fue de 0.9 MPa, en el punto medio de la mitad de la viga longitudinal, lo cual provee un factor de seguridad descrito en la expresión (4.17) con lo cual se verifica la resistencia de la estructura en este caso examinado.

$$FS = \frac{\sigma_{max}}{\sigma} = \frac{145}{0.9} = 161 \quad (4.17)$$

Luego, en la Figura 4.55, se observa el esfuerzo en el eje Y, el cual representa el esfuerzo de pandeo al que se someten las columnas y el cual fue examinado mediante un análisis previo, y se observa un esfuerzo máximo de aproximadamente 1 MPa. Con lo cual se verifica con un factor de seguridad de 8.9, que el esfuerzo es menor al máximo de la expresión (4.18) es mayor que el máximo encontrado en la simulación.

$$\sigma < \frac{\sigma_{max}}{FS} = \frac{145}{8.9} = 16.29 \text{ MPa} \quad (4.18)$$

Type: Normal Stress Smax  
Units: MPa  
3/11/2022, 19:50:37

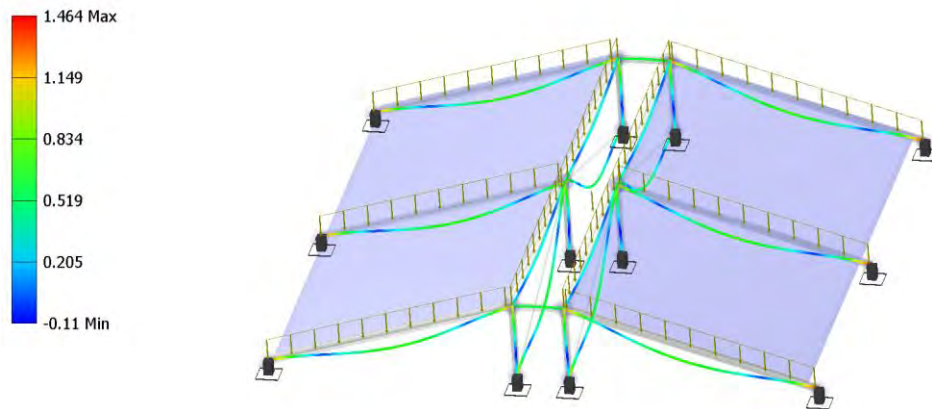


Figura 4.55 Simulación de esfuerzo normal para vigas longitudinal de estructura

Type: Bending Stress (My) max  
Units: MPa  
3/11/2022, 19:52:39

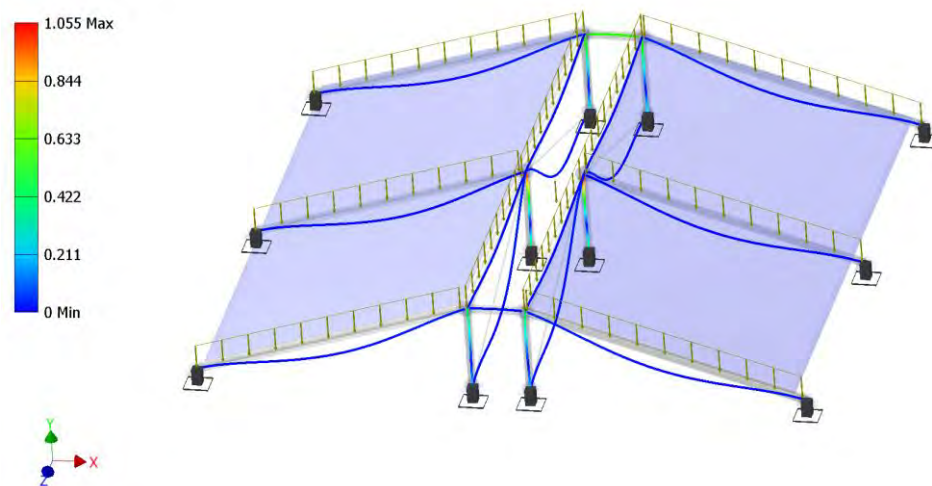


Figura 4.56 Simulación de esfuerzos en eje vertical para columnas de estructura

## CAPÍTULO V: Diseño del subsistema de navegación del vehículo autónomo

### 5.1 Diagrama de bloques

En la Figura 5.1, se puede observar una primera etapa de generación de ruta global, basada en la información del punto final deseado de la ruta, y la generación de un mapa con *Probabilistic Road Map* (PRM), para obtener el camino óptimo con búsqueda A\*. El cual debe alimentarse del radar para identificar los obstáculos estáticos no considerados en su mapa original, pues en esta zona se encuentran pozos abandonados de extracción de hidrocarburos. Luego, con la cámara estereoscópica se realiza la examinación de los posibles obstáculos dinámicos, los cuales se refieren a embarcaciones que posiblemente naveguen en esta zona. Si no se identifica, solo se realiza el seguimiento de ruta con la planificación local *Line of Sight*, propulsándose solamente a base de olas con la subunidad sumergida y guiándose con el timón. Sin embargo, si existen vehículos, se les evitará con el algoritmo de *velocity obstacle* a partir de los datos de velocidad y orientación de la cámara estereoscópica. Para lo cual se hará empleo de los propulsores auxiliares y timón. Finalmente, los algoritmos y controladores emplearán las mediciones del sensor inercial y GPS compass, los cuales deben pasar por un filtro Kalman para estimar eficientemente la posición del vehículo.

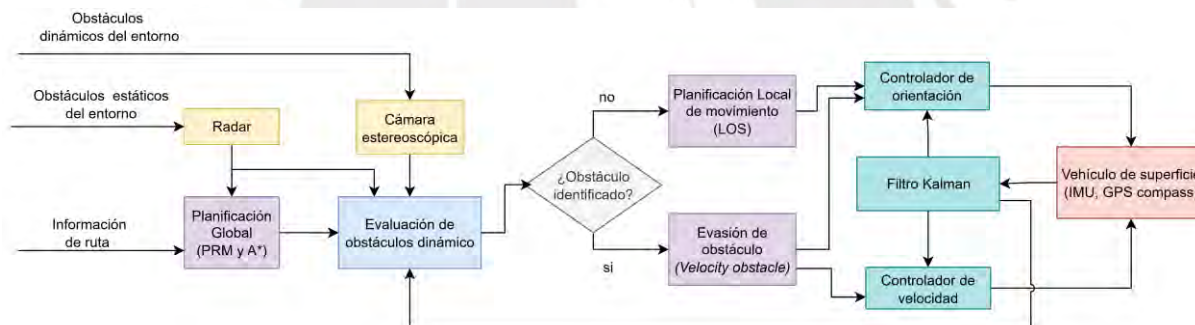


Figura 5.1 Diagrama de navegación autónoma

### 5.2 Componentes del subsistema de navegación y control

A continuación, se presentará la elección de los componentes que se componen por sensores de percepción activos, pasivos, inerciales y de posición. Además, de la unidad de procesamiento. Como sensor de percepción activo se escogió el radar, debido a que proporciona un escaneo confiable del entorno a gran rango de distancias. Dentro de las opciones comerciales del radar, se seleccionó el DRS2D-NXT, principalmente por la característica del menor rango mínimo de senseo con 20 m y con una interfaz que se pueda acoplar al procesador, en este caso vía ethernet.

Cabe precisar que el encargado del procesamiento de las ondas de llegada es el radar con su esquema descrito en la Figura 5.2. De tal manera que transmite la información en forma de

imágenes a la unidad de procesamiento a la que se le conecta, a partir de las cuales este debe extraer las características importantes y que lleva información de los obstáculos.

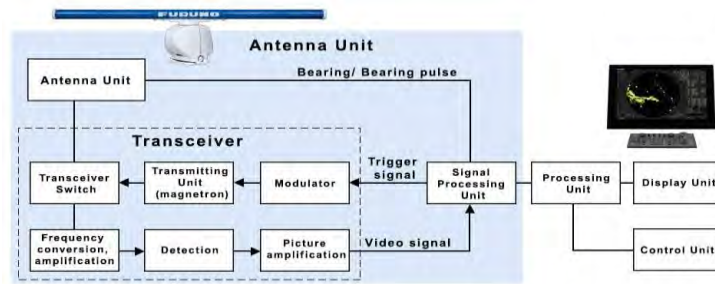


Figura 5.2 Diagrama de flujo de datos del radar  
Fuente: (Furuno)

### *Cámaras estereoscópicas*

Luego, se escogen las cámaras encargadas de la percepción pasiva, pero que obtendrá los datos necesarios de los obstáculos dinámicos. Se escoge la cámara multisense s30, pues es una cámara preparada para enfrentar entornos complicados al presentar una protección IP77. Además, presenta un rango mínimo y máximo adecuado (1.5 m a 30 m) con una precisión aceptable para los requerimientos.



Figura 5.3 Cámara Multisense S30  
Fuente: (Carnegierobotics)

### *GPS compass*

En el caso del sensor para la posición y orientación. A partir de las opciones, se escoge el GPS compass Vector V133, ya que presenta una precisión adecuada de posicionamiento (0.3 m), y empleando los sistemas de corrección ATLAS y SBAS, las cuales mejoran el posicionamiento.



Figura 5.4 GPS compass Vector V133  
Fuente: (Ja-gps)

### *Sensor inercial*

Como sensor inercial, se selecciona el sensor Orientus como sensor inercial, priorizando la estabilidad durante el empleo. Ya que el sensor será empleado de manera prolongada, para lo cual se requiere una baja inestabilidad en el tiempo (3 °/hr) y bajo consumo de energía (325 mW).



Figura 5.5 Sensor Orientus  
Fuente: (Advancednavigation)

### *Luz de navegación*

Además, es necesario incluir una luz de navegación, por norma de reglamento para evitar abordajes (COLREG), pues por el tamaño solo exige una. En la Figura 5.6, se presenta la opción con un consumo bajo de energía, al emplear luz LED y de tamaño adecuado para el vehículo. Además, sus principales características se encuentran en la Tabla 5.1. En la Figura 5.7 se puede apreciar el soporte de aluminio que sostendrá a la luz de navegación, el cual está unido a la parte superior de la estructura de paneles solares, mediante uniones atornilladas M10.



Figura 5.6 Luz de navegación  
Fuente: (OSCOLATI)

Tabla 5.1 Luz de navegación

Características	Valores
Altura	148 mm
Diámetro	60 mm
Voltaje	12-24v
Consumo	1.7W



Figura 5.7 Luz de navegación

### Procesador

Para la placa reducida de procesamiento se necesitan las siguientes características:

- 1 ethernet (dos se pueden colocar en router)
- 3 Rs232
- Procesamiento para búsqueda de camino global empleando diagrama Voronoi (GPU)
- Procesamiento de cámara estereoscópica (*Disparity map, kmeans, optical flow algorithm*)
- Procesamiento de imágenes de radar
- Procesamiento para velocity obstacle y line of sight

Se escoge el procesador NVIDIA ORIN AGX debido a que posee la capacidad para poder desarrollar los algoritmos requeridos, pues llega a los 200 TOPS. Además, debido a la tarjeta gráfica y CPU que posee es capaz de procesar los sensores de percepción a la vez. Para los requerimientos de los puertos, dos de los sensores serán conectados al router elegido en el subsistema de comunicación remota. Mientras los RS232, se acoplarán a los puertos USB con el empleo de adaptadores.



Figura 5.8 JETSON ORIN

Fuene: (Nvidia)

### Controlador para actuadores

Para el controlador de los actuadores, se necesitan los siguientes requerimientos:

- 1 salida digital para luz, la cual activará una bobina
- 3 salida pwm para ESC de actuadores y servomotor del timón

Se selecciona el NUCLEO-F030R8, debido a que cumple con los requerimientos de las salidas modulares y digitales; y es de bajo costo.



Figura 5.9 NUCLEO-F030R8

Fuente: (STMicroelectronics)

### *Soportes*

A continuación, se muestra el soporte que sostendrá al radar y cámara estereoscópica en la parte frontal del vehículo de superficie. Se compone de un tubo circular principal de acero inoxidable 316, además de planchas para la sujeción de los sensores del mismo material, ver Figura 5.10.



Figura 5.10 Soporte de radar y cámara estereoscópica

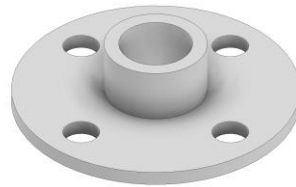


Figura 5.11 Base del soporte de radar y cámara

La unión con el casco principal se realiza con tuercas remachables, con diámetro nominal 10, en la base, ver Figura 5.12.

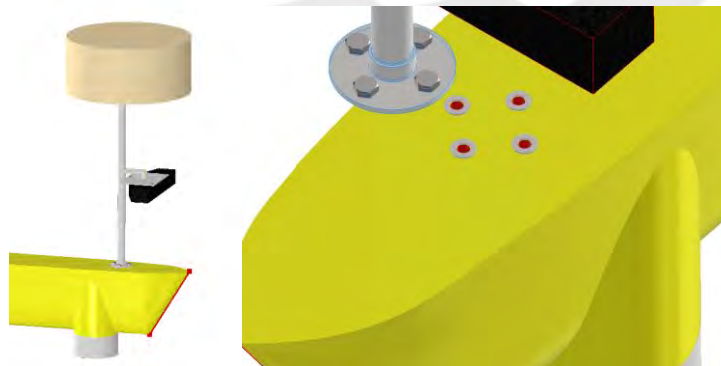


Figura 5.12 Ensamble de unión con casco principal

Además, se examina el pandeo de la barra que soporta el radar y cámara estereoscópica, del cual se determina emplear una tubería circular de acero 316 con diámetro exterior de 30 mm y espesor de 1.5 mm (ver Anexos B.13).

### 5.3 Arquitectura del hardware

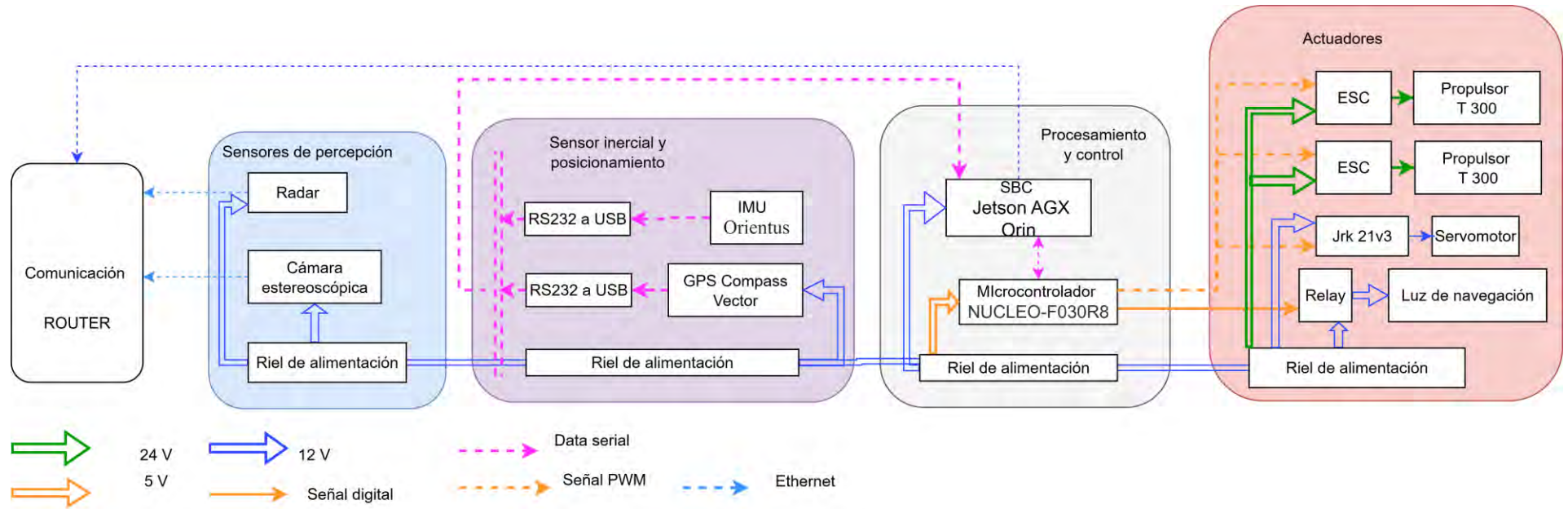


Figura 5.13 Diagrama electrónico del subsistema de navegación

## 5.4 Planificación global

Para proveer de versatilidad en la designación del camino a recorrer por el vehículo, se emplea una generación del mapa a base de nodos aleatorias, cuyo método se denomina PRM (*probabilistic road map*). Este se aplicará al mapa preconocido que se tiene de la zona de trabajo, ver Figura 5.14, para que luego de asignados los nodos y uniones, se emplee una búsqueda A\* en ellos según los puntos designados por el usuario. Así, el mismo usuario podrá darle la forma de trayectoria que desee en el mapa.

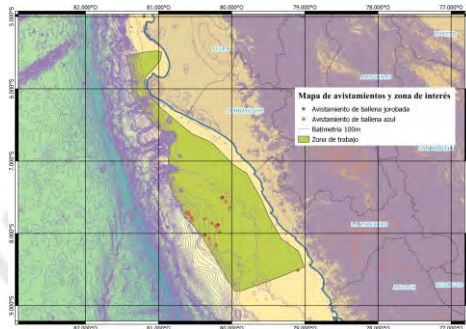


Figura 5.14 Mapa de la zona de trabajo

En primera instancia, se presenta el mapa a emplearse según coordenadas de latitud y longitud, donde los límites tanto de tierra y marítimos se delimitan con un perímetro descrito en la Figura 5.15 con puntos azules. Luego, se limita el espacio disponible con obstáculos en forma de círculos, ver Figura 5.17. Antes de ejecutar el algoritmo PRM, se normalizan las coordenadas de latitud y longitud, en un rango de  $-0.5$  a  $0.5$ , como resultado se obtiene la Figura 5.18.

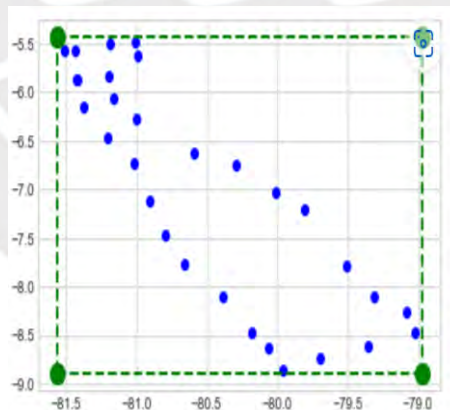


Figura 5.15 Perímetro zona de trabajo

Luego, se ejecuta el método descrito por el pseudocódigo del método PRM en la figura 5.16 donde realiza la ubicación de nodos fuera de los obstáculos. Y prosigue con la creación de las uniones entre nodos, con la condición de que no exista intersecciones con los obstáculos, el proceso se aprecia en Anexos C.1. Así, para un proceso de solamente 12 nodos, se obtiene la siguiente Figura 5.19.

### Método Probabilistic Road Map (PRM)

*Se lee los puntos de obstáculos*

*Se agrega punto de inicio a la cadena*

**Por cada valor** en el rango de la cantidad de puntos  $N$

**Mientras** que el valor random está en zona de obstáculos

*Se genera valor random entre 0 y 1 para coordenada  $x$  e  $y$*

*Se centraliza a coordenadas (0,0) en el medio*

*Se verifica que no se encuentre dentro de los obstáculos definido como circunferencias con posición y radio*

**Fin de mientras**

*Se calcula el valor heurístico de la posición empleando la posición final  $x_f$  e  $y_f$*

*Se agrega a cadena (índice, posición en  $x$ , posición en  $y$ , valor heurístico)*

**Fin de cada valor**

*Se agrega en último índice la posición destino*

**Por cada punto** en cadena

*Obtener 5 puntos más cercanos calculando distancias entre todos los puntos y ordenando por cercanía*

**Por cada punto** más cercano

*Se verifica si la unión de los puntos atraviesa obstáculos*

*Se verifica si la posible unión de los puntos ya existe*

*Solo si cumple ambas verificaciones se agrega como nueva unión*

**Fin de puntos** cercanos

**Fin de puntos** en cadena

*Se guardan los puntos y uniones resultantes*

Figura 5.16 Pseudocódigo del método Probabilistic Road Map (PRM)

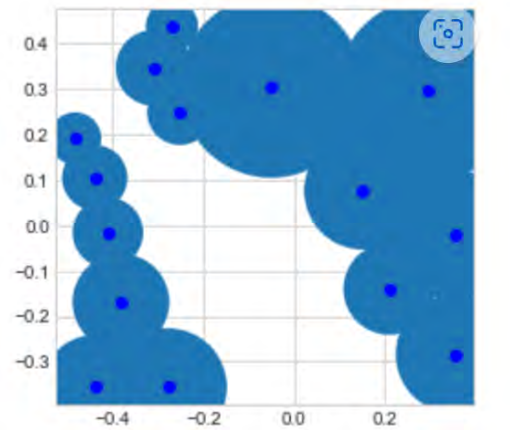


Figura 5.17 Mapa delimitado con obstáculos

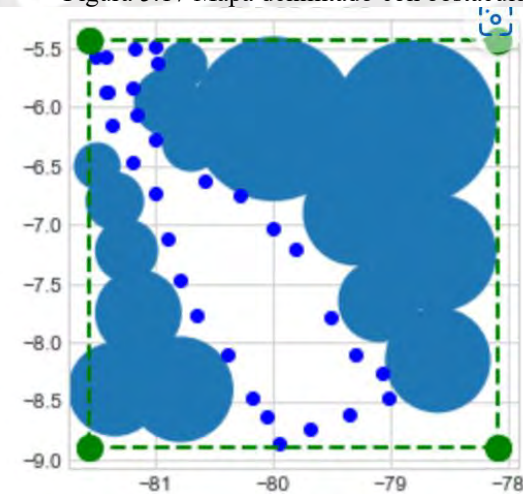


Figura 5.18 Mapa normalizado con obstáculos

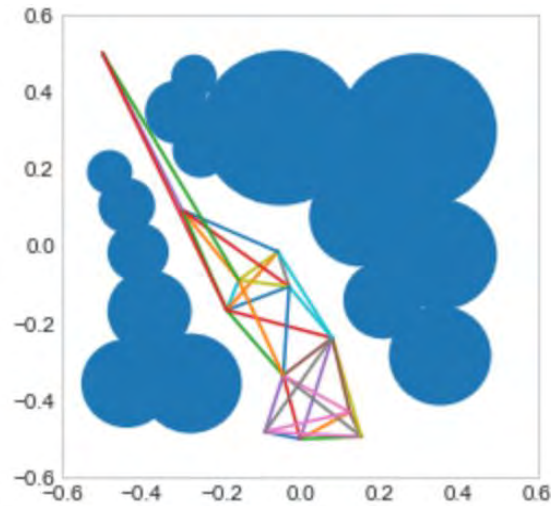


Figura 5.19 Mapa de nodos y uniones como resultado de PRM

Por último, se aplica el algoritmo A\*, para realizar la búsqueda del camino más corto entre los puntos iniciales y finales del trecho, los cuales se designan como  $(0.0; -0.5)$  y  $(-0.5; 0.5)$  respectivamente. El pseudocódigo se puede apreciar en la Figura 5.20. Como resultado se obtiene la Figura 5.19.

**Algoritmo A \***  
 Se lee los nodos obtenidos en el método PRM  
**Por cada** nodo en nodos de PRM  
   **Si es** primer nodo  
     Inicializar costos pasados y costos totales  
   **Si no es** primer nodo  
     Se agrega costo infinito en costos pasados y costos totales  
   **Fin de si**  
 Se inicializa con nodo 1  
**Mientras existan** nodos abiertos  
   Se setea como nodo actual al primer elemento de nodos abiertos  
   Se agrega como nodos cerrados en nodo actual  
   Se retira el primer elemento de nodos abiertos  
   **Si el primer nodo** abierto es el nodo meta final  
     Se culmina algoritmo y se busca en los nodos padres a partir del nodo meta, formándose la cadena de nodos final  
   **Fin de si**  
   Se obtiene las uniones vecinas del nodo actual que no estén dentro del grupo de nodos cerrados  
   **Por cada unión** en las uniones vecinas  
     Se estima el costo pasado tentativo a partir de la longitud de la unión mas el costo pasado del nodo actual  
     **Si la primera** componente de la unión es el nodo actual entonces el nodo vecino es el otro componente de la unión  
     **De otra forma** se define como nodo vecino el primer componente de la unión  
     **Fin de si**  
     **Si el costo pasado** tentativo es menor que los costos pasados del nodo vecino  
       Agregar el costo tentativo como el costo pasado del nodo vecino  
       Agregar a los nodos padres el nodo actual  
       Agregar el costo total estimado al lugar del nodo vecino  
       Se agrega el nodo como nodo abierto ordenado según el costo pasado  
     **Fin de si**  
   **Fin de uniones**  
**Fin de mientras**  
**Fin de nodos**

Figura 5.20 Pseudocódigo de algoritmo A \* empleando resultado de método PRM

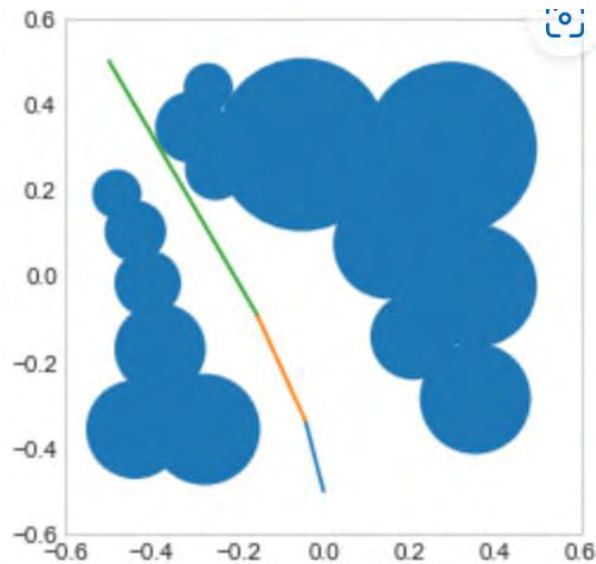


Figura 5.21 Ruta final de algoritmo A\*

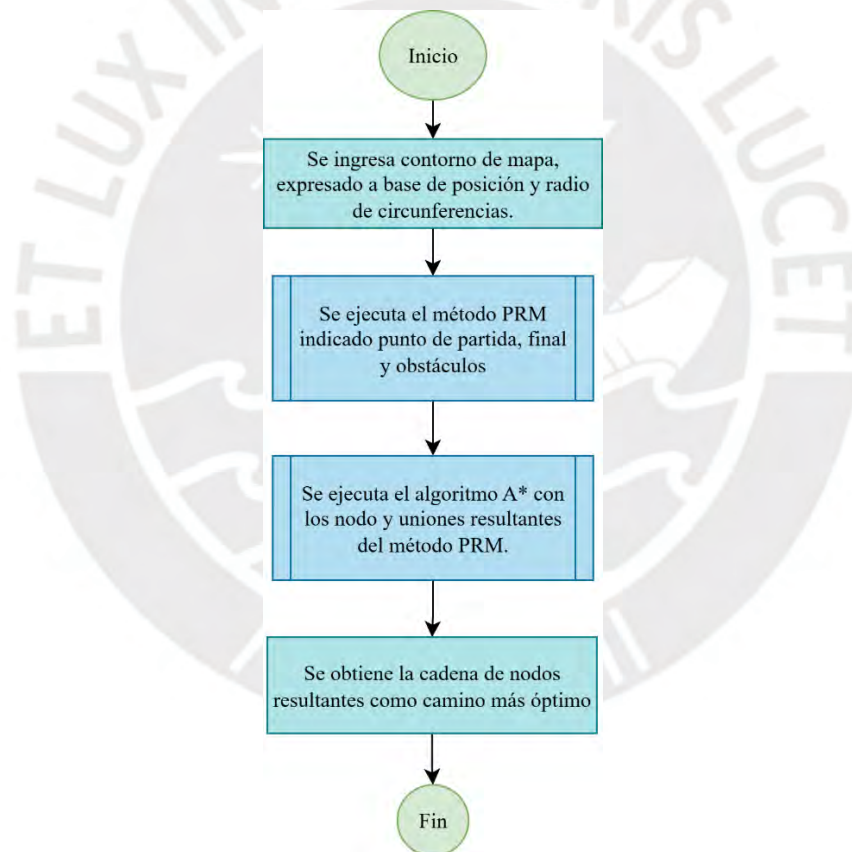


Figura 5.22 Diagrama de flujo de planificación global

## 5.5 Planificación local

### 5.5.1 Planificación de movimientos sin evasión de obstáculos

Cuando no exista presencia de obstáculos, el vehículo llevará a cabo un seguimiento de puntos del camino, obtenido a partir de la etapa de planificación global. Para ello, solo actuará el timón ubicado en el casco principal, mientras la propulsión solamente es a base de la subunidad

sumergida. Para ello, primero se realiza un modelamiento de la embarcación de superficie, descrita en la sección 5.6.2. En la cual, se emplea el modelo que solo incluye como actuador al timón, es decir en el modo de navegación normal.

#### Seguimiento de camino

Se emplea el algoritmo *Line of Sight* (LOS) para que la embarcación siga al arreglo de puntos que forma el camino global planificado.

$$Pos = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_L, y_L)\} \quad (5.1)$$

Luego, se determina la distancia anticipada ( $\Delta$ ), *look-ahead*, la cual es un parámetro crucial para la convergencia de la embarcación hacia el camino. mientras que el error de seguimiento ( $e$ ), determina la distancia mínima de la embarcación con la posición. Basado en  $e$  y  $\Delta$ , se determina la posición LOS. En la Figura 5.23, se puede apreciar los parámetros mencionados, así como el esquema del seguimiento del camino, donde la dirección deseada es el vector  $\overrightarrow{P_t P_{LOS}}$ .

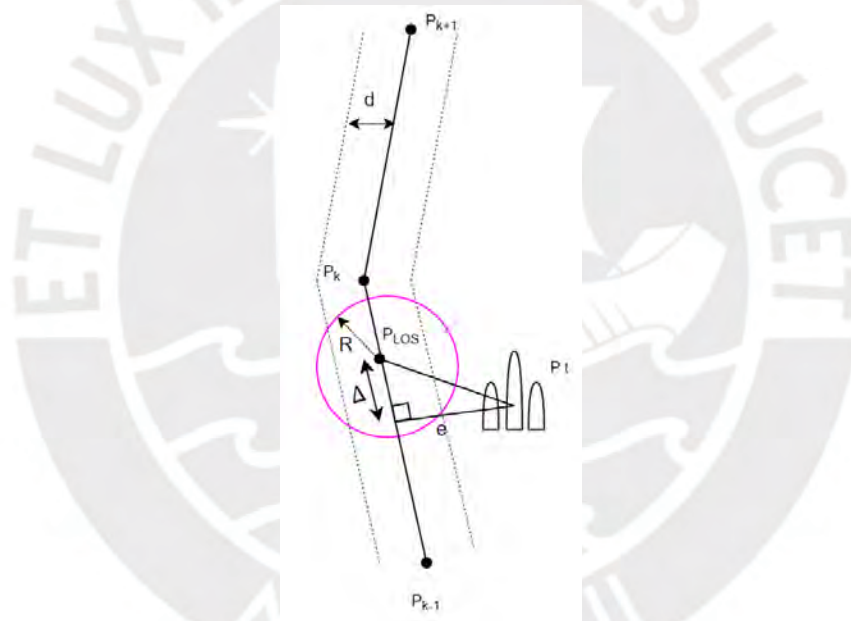


Figura 5.23 Diagrama de parámetros de LOS

Entonces, el curso de dirección de la embarcación deseada es  $\phi_t$ , mientras que el real en el tiempo es  $\phi_t$ . Debido a la forma de propulsión, en este estado la embarcación posee baja maniobrabilidad, por lo cual el curso de dirección deseado no cambiará, mientras el vehículo esté navegando hacia el círculo restringido señalado en la Figura 5.23. Una vez dentro, se sigue el modo de control, que designa que el nuevo curso deseado es el curso en el momento que entra ( $\phi_d = \phi_t$ ). Mientras la distancia  $d$ , se define con la expresión (5.2)

$$d = \sqrt{R^2 - \Delta^2} . \quad (5.2)$$

Entonces, el área de navegación ideal de la embarcación es entre las líneas que delimitan  $d$  y cada vez que se encuentre fuera de la circunferencia  $R$ , el curso deseado cambiará, por razones

de no exigir una maniobrabilidad no posible con las condiciones de navegación y que solo terminaría en mayor consumo energético. Luego, el diagrama de flujo que conlleva el seguimiento de la ruta es la observada en la Figura 5.24.

### Simulación

Para la simulación del seguimiento de ruta, se emplea el modelado dinámico explicado en la sección 5.6.1, junto al controlador de dirección del vehículo de superficie de la sección 5.6.2. En la implementación, se emplea una distancia de zona de navegación ( $\Delta$ ) de 5 m y un radio de evaluación ( $R$ ) de 5 m. El esquema implementado en *Simulink*, se observa en la Figura 5.25, donde se aprecia la implementación en una función del algoritmo, el cual entrega la orientación deseada del vehículo al controlador, el cual genera la posición angular del timón y este ingresa al modelo dinámico.

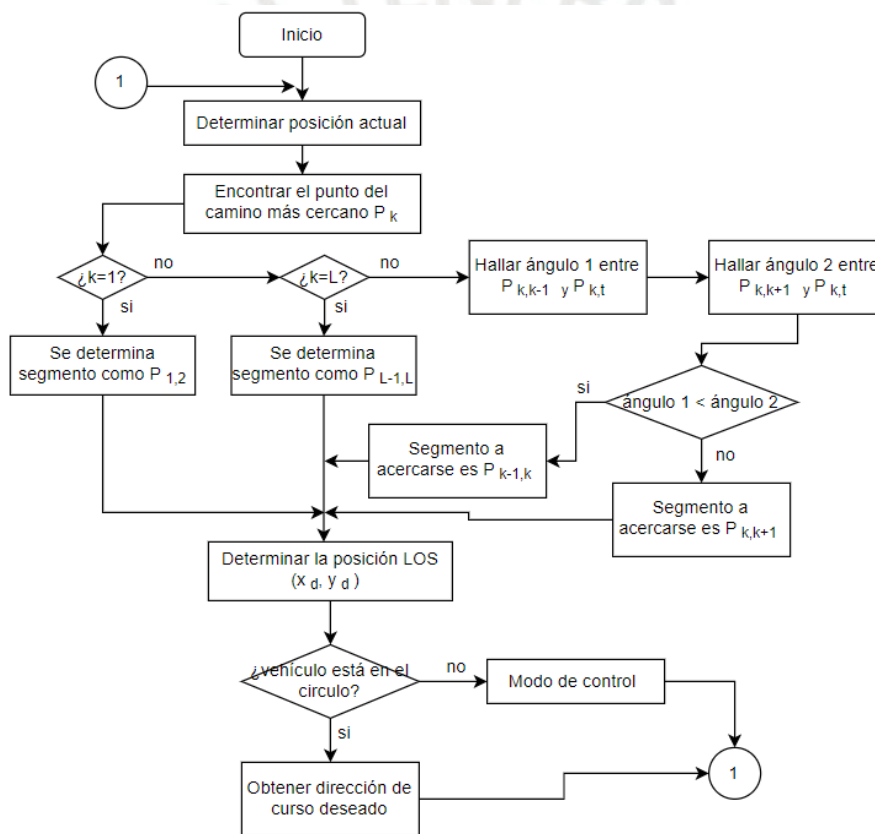


Figura 5.24 Diagrama de flujo de LOS

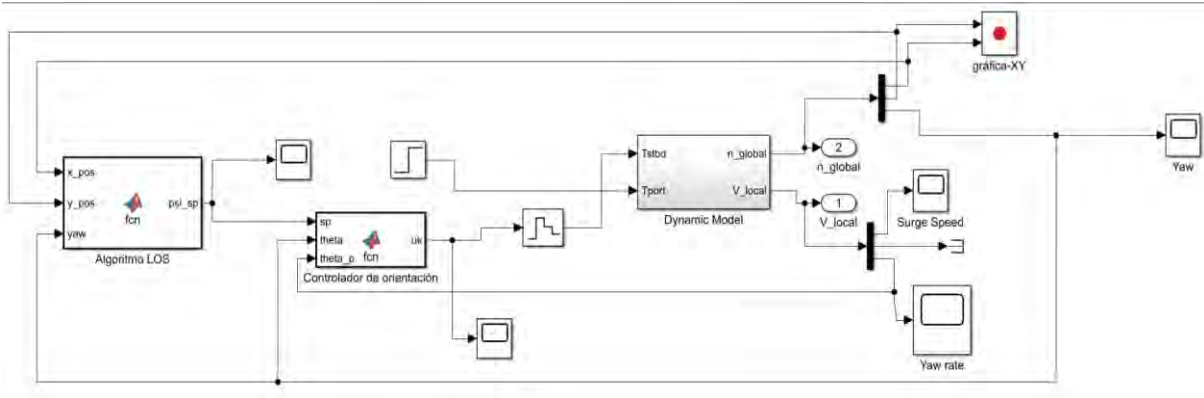


Figura 5.25. Esquema de simulación en Simulink

donde  $\rho$  es la densidad del agua,  $v$  es la velocidad del flujo,  $\delta$  es la posición angular del timón,  $A$  es el área del timón,  $C_p$  coeficiente de fuerza de arrastre y  $C_l$ , coeficiente de fuerza tangencial. Luego, el momento respecto al centro de referencia se plantea con la expresión (5.3)

$$T_z = F_y \frac{L}{2}, \text{ donde } L \text{ es la longitud del casco} \quad (5.3)$$

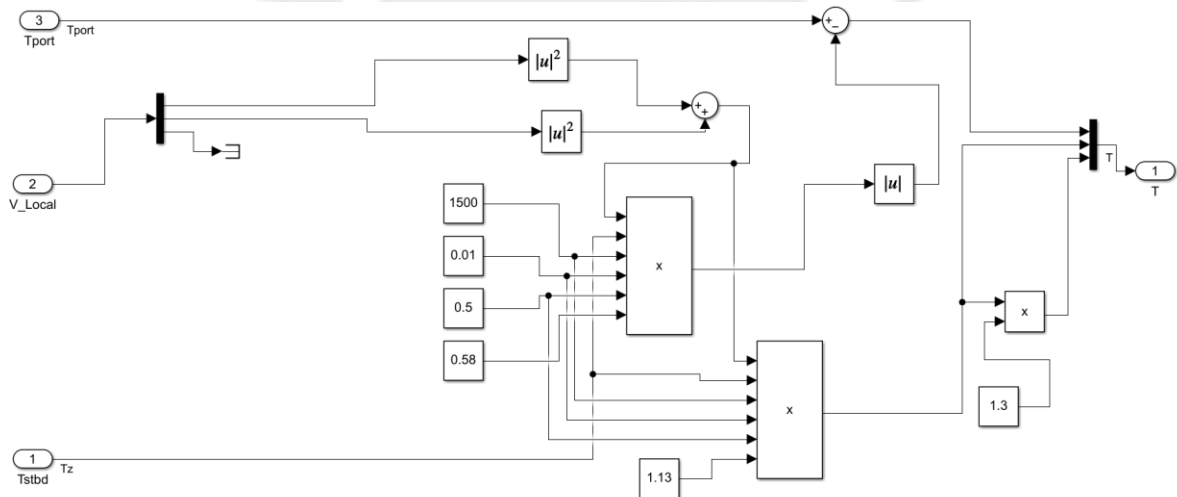


Figura 5.26 Esquema de generación de fuerza del timón en simulación

En la Figura 5.27, se puede observar el seguimiento de la ruta del vehículo de superficie con respecto a la ruta entregada a seguir. La duración fue de 400 s y se aprecia que se logra la cercanía delimitada con los parámetros del algoritmo, cabe precisar que por el tipo de propulsión y al existir solamente un actuador el cual es el timón, la maniobrabilidad es baja, además que por el ahorro de energía, el empleo de actuadores debe ser reducido al mínimo, es por ello que con la inclusión de  $\Delta$  y  $R$ , se asegura un acercamiento dentro de 5 m, sin exigir un cumplimiento exacto de la ruta.

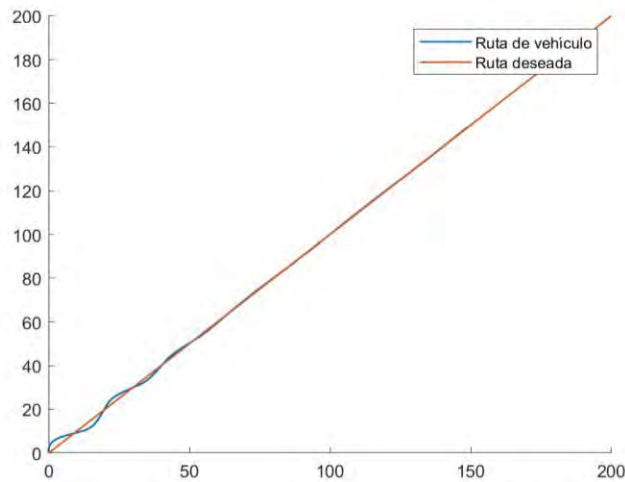


Figura 5.27 Resultados de simulación de ruta

La velocidad angular del vehículo en el tiempo, se puede apreciar en la Figura 5.28, donde se aprecia que se realizan los cambios de la velocidad angular por cada empleo del timón en el tiempo.

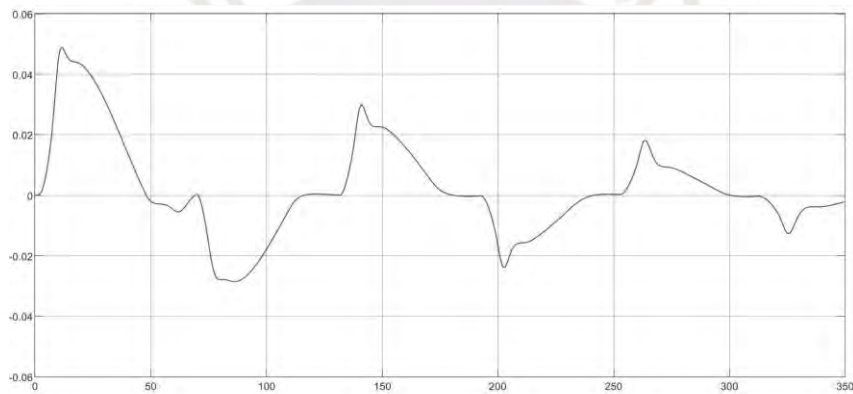


Figura 5.28 Cambios de velocidad angular en el tiempo

Finalmente, el control de la posición angular del vehículo a lo largo del tiempo se puede apreciar en la Figura 5.29. Donde se aprecia que con el control del timón se va cambiando la posición angular de modo que pueda cumplir con la ruta, el desarrollo del controlador se encuentra en la sección 5.6.2.

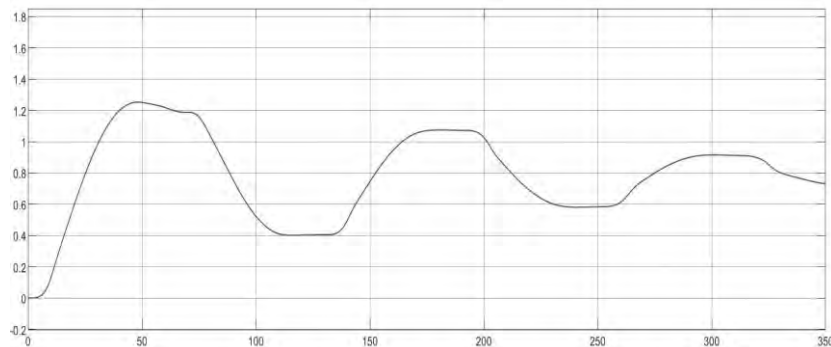


Figura 5.29 Posición del vehículo durante simulación

### 5.5.2 Planificación de movimiento con evasión de obstáculos

En este estado de navegación, existe algún obstáculo dinámico detectado con el que el vehículo debe evitar la colisión. Para lo cual, se debe regir a evitarlo según las normas para evitar abordajes (COLREG), las cuales se pueden resumir en tres casos. Primero, cuando puede suceder en la zona de *overtaking*, donde el vehículo debe dirigirse por uno de los lados laterales para evitar la colisión, ver Figura 5.30. Segundo, cuando sucede en la zona *head-on*, ambos vehículos deben pasar por sus lados izquierdos de cada uno. Tercero, cuando sucede en la zona *crossing*, el vehículo que está por cruzar debe esperar a que el otro vehículo siga el paso o pasar por detrás del otro vehículo.

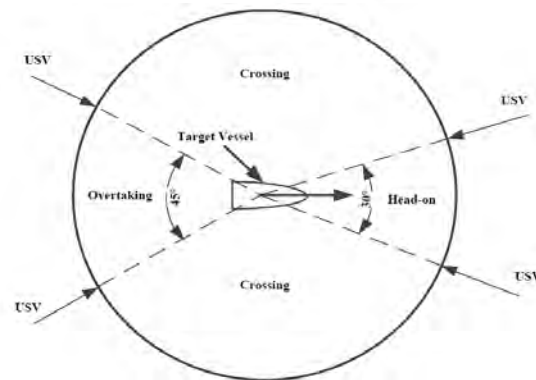


Figura 5.30 Definición de entorno en colisiones  
Fuente: (Bucknall, 2019)

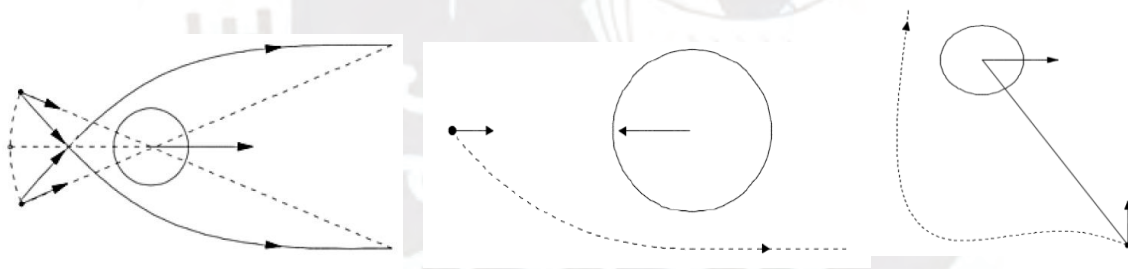


Figura 5.31. Posible colisión en zona *overtaking* (a), *head-on* (b) y *crossing* (c)  
Fuente: (Bucknall, 2019)

Por ello, primero el vehículo debe determinar si se encuentra en peligro de colisión. Lo cual se determinará según los ángulos entre la velocidad relativa con la línea entre vehículos, y el ángulo entre la línea de tangencia y la de unión entre vehículos, ver Figura 5.32. Los cuales se determinan con la expresión (5.4)

$$\phi = \arctan\left(\frac{R}{\sqrt{D_{usv-obs}^2 - R^2}}\right), \text{ y } \gamma = \angle(V_{re}; \hat{D}_{usv-obs}) \quad (5.4)$$

Entonces, se determinará que se encuentra en una situación de posible colisión, a partir de la expresión (5.5)

si  $\gamma > \phi$ , entonces no existe peligro de colisión, o  
 si  $\gamma < \phi$ , entonces existe peligro de colisión (5.5)

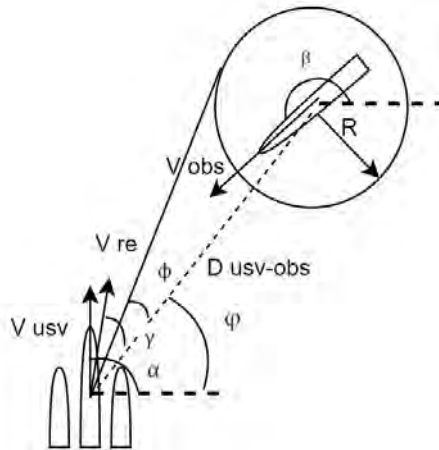


Figura 5.32 Esquema de vehículo frente a obstáculo dinámico

Luego, se decide en qué caso de colisión se encuentra con la inclinación del vehículo de superficie y la inclinación del obstáculo dinámico. Denotando al ángulo del avance como  $\alpha$  y la orientación del obstáculo como  $\beta$ .

#### Algoritmo de evasión de colisión

El ángulo relativo entre el vector velocidad relativa y la unión de vehículo - obstáculo, se puede determinar con la expresión (5.6)

$$\gamma = \tan^{-1}(f(v_A, v_B, \alpha, \beta)), \quad (5.6)$$

cuya derivada se puede determinar con la expresión

$$\partial\gamma = \frac{1}{1+\gamma^2} \partial f, \text{ donde } \partial f = \frac{\partial f}{\partial v_A} \partial v_A + \frac{\partial f}{\partial \alpha} \partial \alpha,$$

suponiendo que  $v_B$  y  $\beta$  son constantes. Relacionando entre vectores de velocidad, y cambiando el diferencial con variación (Bucknall, 2019). La variación de velocidad y orientación para el vehículo están definidos por las expresiones (5.7)

$$v_A \Delta\alpha = \Delta V \Delta\gamma \cos(\varphi(v_A, \Delta V)) \text{ y } \Delta v_A = \Delta V \Delta\gamma \sin(\varphi(v_A, \Delta V)). \quad (5.7)$$

#### Overtaking

La variación del ángulo de velocidad relativa por cada intervalo de tiempo ( $\Delta\gamma$ ) se define con las expresiones (5.8), cuando el ángulo de orientación del obstáculo es mayor al del vehículo, se sigue la expresión (5.9)

$$\Delta\gamma = -(\gamma + \phi); \alpha \leq \beta \text{ y } \varrho \geq \phi \quad (5.8)$$

$$\Delta\gamma = -(\gamma - \phi); \alpha \leq \beta \text{ y } \varrho < \phi, \quad (5.9)$$

donde  $\varrho = \gamma + \phi$ ; si el ángulo de orientación del obstáculo es menor al del vehículo, se sigue la expresión (5.10)

$$\Delta\gamma = (\gamma - \phi); \beta \leq \alpha \text{ y } \varrho \geq \phi \text{ y } \Delta\gamma = (\gamma + \phi); \beta \leq \alpha \text{ y } \varrho < \phi. \quad (5.10)$$

### Head-on

Para esta situación el vehículo debe evadir por el lado izquierdo del obstáculo, por lo cual se varia el ángulo de velocidad relativa ( $\Delta\gamma$ ), con la expresión (5.11)

$$\Delta\gamma = -(\gamma + \phi); \varrho \geq \phi \text{ y } \Delta\gamma = -(\gamma - \phi); \varrho < \phi. \quad (5.11)$$

### Crossing

El vehículo deberá pasar por detrás del obstáculo dinámico, por lo tanto se divide en dos situaciones posibles, el primero es cuando  $\alpha \geq \varrho$ , y se rige con la expresión (5.12)

$$\Delta\gamma = -(\gamma + \phi); \varrho \geq \phi \text{ y } \Delta\gamma = -(\gamma - \phi); \varrho < \phi, \quad (5.12)$$

el segundo caso es cuando  $\alpha < \varrho$ , bajo la expresión (5.13)

$$\Delta\gamma = (\gamma - \phi); \varrho \geq \phi \text{ y } \Delta\gamma = (\gamma + \phi); \varrho < \phi. \quad (5.13)$$

Entonces, se sigue el diagrama de flujo de la Figura 5.33.

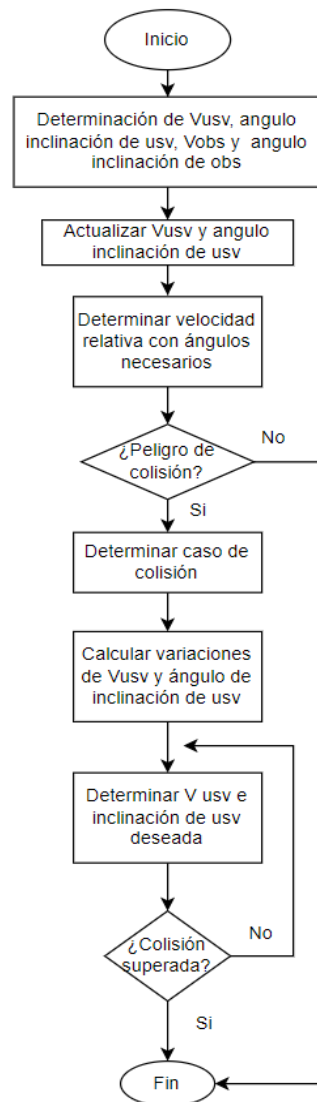


Figura 5.33 Diagrama de flujo de velocity obstacle

### 5.5.3 Simulación de ruta del vehículo

Para la simulación de ruta total se integran ambos algoritmos de navegación de *Line of Sight* y *Velocity obstacle*, de los cuales se elige según peligro de colisión con obstáculos, mediante una evaluación de ángulos anteriormente descrita. En la Figura 5.34 se puede apreciar los bloques empleados para la simulación integrada, donde se emplea el controlador de posición angular de la sección 5.6.1 y el controlador de velocidad del vehículo desarrollado en la sección 5.6.2.

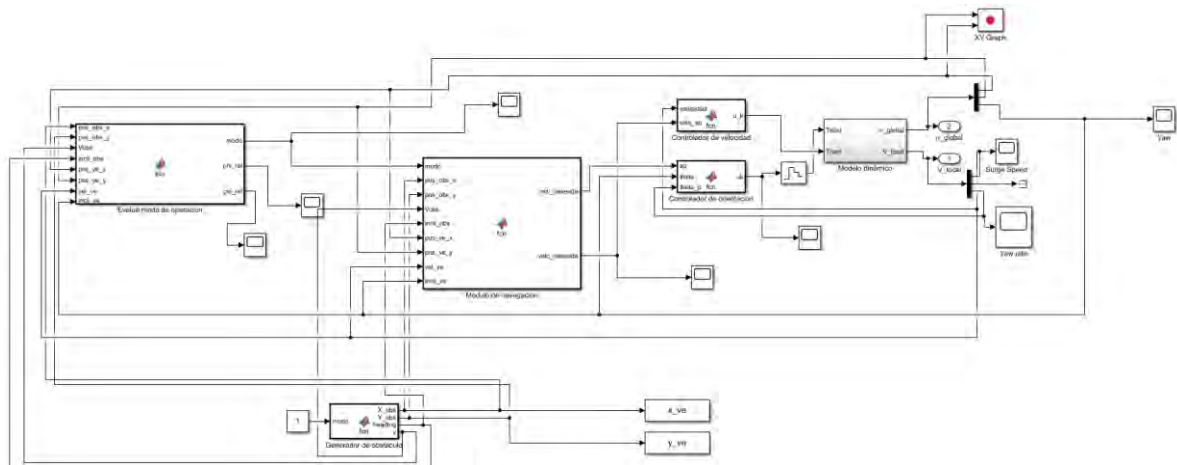


Figura 5.34 Bloques en simulink para simulación de navegación integrada

En total, se simularon 3 modos de obstáculos dinámicos, los cuales incluyeron a los dos tipos de caso “*crossing*” y el caso “*head-on*”. Como primer obstáculo se evalúa el peligro de colisión “*head-on*”, con una generación de obstáculos en la línea de dirección de la ruta probada, con los parámetros de la Tabla 5.2. Así, se obtuvo la ruta observada en la Figura 5.35, donde el vehículo evade al obstáculo alejándose de éste y evitando la colisión, pues se aprecia las posiciones señaladas suceden al mismo tiempo, y las cuales no llegan a coincidir en ningún momento.

Tabla 5.2 Tabla de obstáculos

Obstáculo	Situación de colisión	Velocidad	Posición inicial	Dirección
Obstáculo N°1	Head-on	1.2	[20,20]	225
Obstáculo N°2	Crossing left	1.3	[10,0]	135
Obstáculo N°3	Crossing right	1.3	[0,10]	335

Se monitoreó el cambio de modo entre la navegación con o sin propulsores en el tiempo, ver Figura 5.36. Donde se verifica, que el modo de evasión de obstáculos, se activa por aproximadamente 10 s, los cuales sirven para escapar de la zona de peligro y luego vuelve a navegar con la navegación de seguimiento de ruta bajo el algoritmo de LOS, y con el empleo del timón. En el caso del obstáculo 2 con parámetros de la Tabla 5.8, se verifica la situación de

“crossing” que cruza el camino del vehículo. Del cual se obtiene la trayectoria de la Figura 5.37, donde el vehículo ante el obstáculo, emplea los propulsores para pasar primero debido a que es el camino más factible que el de abrirse y pasar por detrás del obstáculo. Para verificar el cambio de modo, se observa en la Figura 5.38 la activación modo en el tiempo.

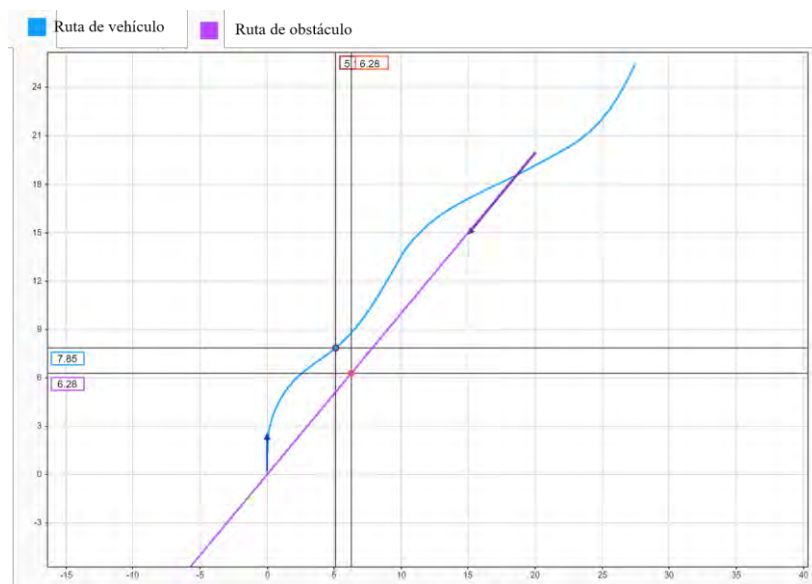


Figura 5.35 Evasión de obstáculo, caso “head”



Figura 5.36 Modo de control en el tiempo de simulación

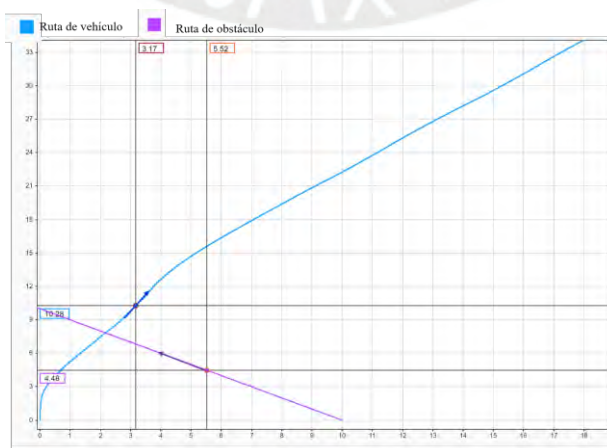


Figura 5.37 Evasión de caso “crossing left”

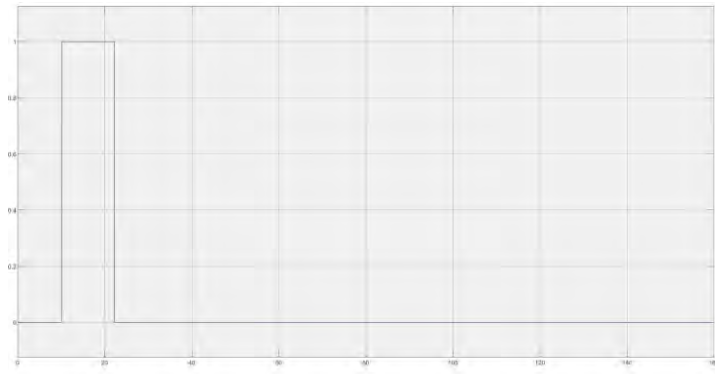


Figura 5.38 Activación del modo de navegación en el tiempo

Finalmente, se verifica el caso de “*crossing right*” en el que respecto al trayecto del vehículo el obstáculo se dirige perpendicularmente hacia la derecha. La trayectoria obtenida es la que se aprecia en la Figura 5.39, donde el vehículo evade el obstáculo pasando por detrás de él mediante una curva y volviendo en dirección de su ruta planificada. Para verificar el cambio de modo de control se aprecia en la Figura 5.40 los cambios de modos de navegación en el tiempo, lo cual demuestra que solo por intervalos emplea los propulsores.

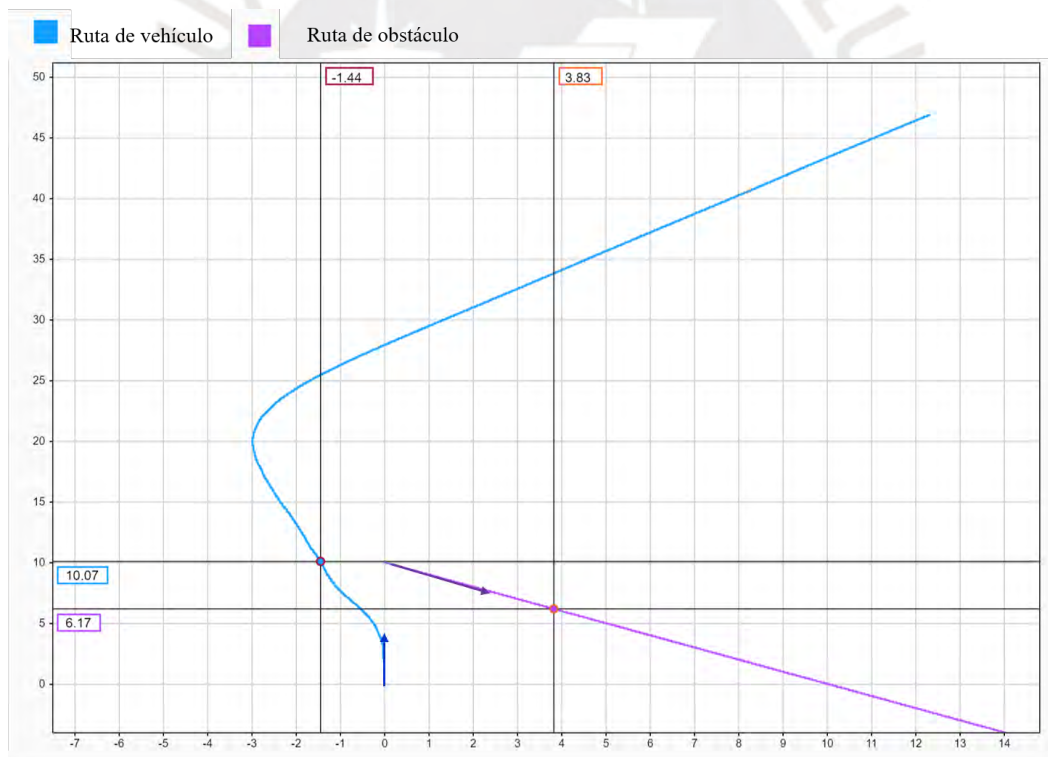


Figura 5.39 Simulación de evasión de obstáculo en caso “cross right”



Figura 5.40 Modo de navegación a lo largo del tiempo de simulación

Finalmente, se realiza una prueba con obstáculos dinámicos continuos y en un mayor intervalo de tiempo, tal se observa en la Figura 5.41, donde se aprecia que el vehículo generó una ruta libre de colisión y antes distintos casos de obstáculos dinámicos, y se rige bajo las normas de las reglas para evitar bordados (COLREG). Por lo tanto, queda verificada la autonomía del vehículo empleando los algoritmos LOS y VO.

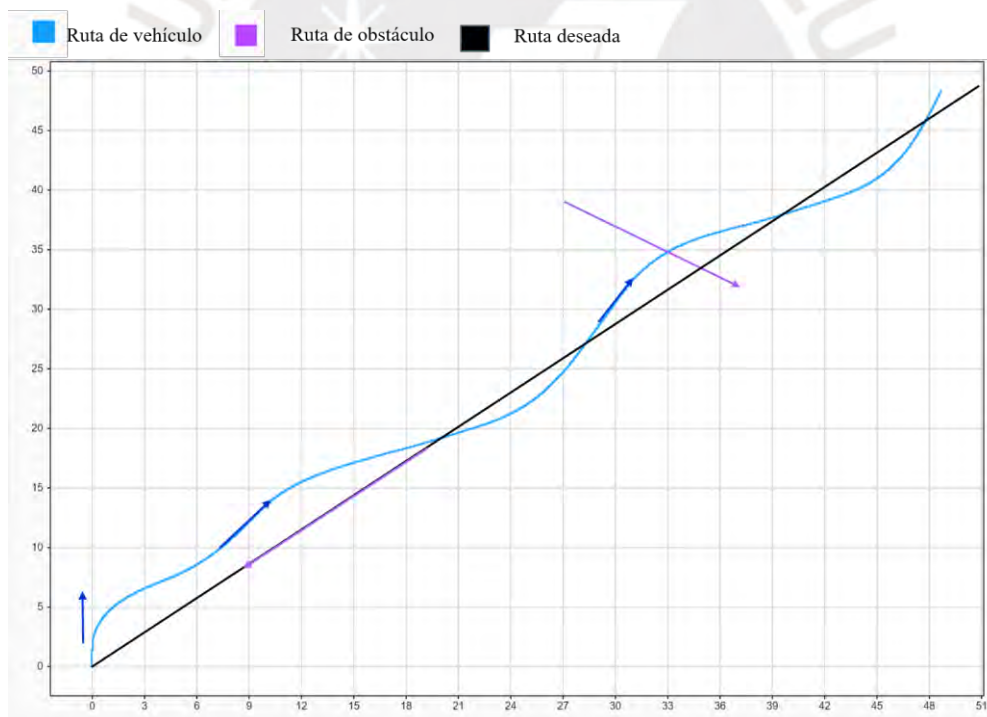


Figura 5.41 Simulación de vehículo antes diferentes casos de obstáculos dinámicos

## 5.6 Control de movimiento

### 5.6.1 Modelo dinámico del vehículo de superficie

Para el vehículo de superficie, se establece un modelamiento de 3 grados de libertad (3-DOF), debido a que este es el que posee el direccionamiento y solo recibe las fuerzas de propulsión. Así, empleando la representación de Euler, se plantea las expresiones

$$\dot{\eta} = \mathcal{J}_{\theta}(\eta)v \quad y \quad (5.14)$$

$$\eta = [x \ y \ z \ \psi]^T. \quad (5.15)$$

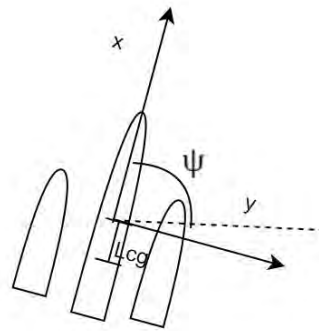


Figura 5.42 Esquema de vehículo de superficie

Luego, las ecuaciones dinámicas son (5.26)

$$M \dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau_{propS} + \tau_{perturbaciones} + \tau_{\delta} + \tau_{prop}, \quad (5.16)$$

donde  $\tau_{\delta}$  es la fuerza del timón;  $\tau_{perturbaciones}$  de las perturbaciones ambientales a presentarse como las olas y vientos, sin embargo, será despreciada por facilidad de simulación;  $\tau_{propS}$  del cordón umbilical que une la superficie con la subunidad sumergida y transmite la fuerza de propulsión; y  $\tau_{prop}$ , se refiere a las fuerzas por los propulsores auxiliares. Sin embargo, la presencia de aquellos no sucede en simultáneo y depende del modo de navegación. Los cuales se distinguen en dos: cuando sigue una ruta propulsándose solamente por la subunidad y cuando evita un obstáculo empleando propulsores. En el primero, la ecuación queda compuesta como (5.17)

$$M \dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau_{propS} + \tau_{\delta}, \text{ y en el segundo caso,} \quad (5.17)$$

$$M \dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau_{prop} + \tau_{\delta}. \quad (5.18)$$

Luego, la matriz M se refiere a la matriz de inercia del sistema y se define con la expresión (5.19)

$$M = M_{RB} + M_A, \text{ donde} \quad (5.19)$$

$M_{RB}$  es la matriz de inercia del cuerpo rígido y se define como

$$\begin{bmatrix} m & 0 & -my_g \\ 0 & m & mx_g \\ -my_g & mx_g & I_z \end{bmatrix}, \quad (5.20)$$

en la que se consideró una masa de 90 kg y  $I_z$  ( $40 \text{ kgm}^2$ ) hallada a partir de las medidas determinadas en el capítulo IV, mientras que  $x_g$  y  $y_g$ , se refieren a la distancia del centro gravedad con respecto al punto de referencia, el cual se escoger como el centro del casco principal, por lo tanto  $y_g = 0$  y  $x_g = 0.1$ . Mientras que  $M_A$  es la matriz de inercia de masa

añadida, la cual se debe a las fuerzas hidrodinámica y se realiza mediante una composición de las velocidades del sistema y ciertas constantes hidrodinámicas.

Luego,  $C$  es la matriz de fuerzas Coriolis y centrípetas con inclusión de la masa añadida. Así, se componen como se muestra en la expresión (5.21)

$$C = C_{RB} + C_A \text{ donde} \quad (5.21)$$

$C_{RB}$  es la matriz a partir del cuerpo rígido y se determina por (5.22)

$$\begin{bmatrix} 0 & -mr & -mx_g r \\ mr & 0 & 0 \\ mx_g r & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5.22)$$

donde  $x_g$  ya ha sido definido, y  $r$  es la velocidad angular del vehículo. Luego, la matriz  $C_A$  corresponde a la de la masa añadida, emplea valores de la matriz  $M_A$  junto con las velocidades para determinar sus componentes. Por otro lado  $D$  es la matriz de amortiguamiento, en la cual se compone de componentes lineales y no lineales. Las primeras, se denominan con la expresión (5.23)

$$\begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & Y_r \\ 0 & N_v & N_r \end{bmatrix}. \quad (5.23)$$

Mientras las componentes no lineales, se determinan con las expresiones de la Figura 5.43. las cuales dependen de un coeficiente de arrastre seccional 2-D, el cual se obtiene mediante el toolbox MSS con la magnitud del ancho y profundidad del casco principal, obteniéndose un valor de 1.83.

$$\begin{aligned} X_{|u|u} &= -\frac{1}{2} \rho S (1+k) C_f < 0 & Y &= -\frac{1}{2} \rho \int_{-\frac{L_{pp}}{2}}^{\frac{L_{pp}}{2}} T(x) C_d^{2D}(x) |v_r + xr|(v_r + xr) dx \\ X &= X_{|u|u} u_r |u_r| & N &= -\frac{1}{2} \rho \int_{-\frac{L_{pp}}{2}}^{\frac{L_{pp}}{2}} T(x) C_d^{2D}(x) x |v_r + xr|(v_r + xr) dx \end{aligned}$$

Figura 5.43 Fórmulas de componentes no lineales

Fuente: (Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, 2011)

### 5.6.2 Controlador de orientación para seguimiento de ruta

Para el seguimiento de la ruta, se desarrolla un controlador del timón activado por un servomotor. Para ello, la respuesta de la velocidad angular del vehículo se aproxima con el modelo de primer orden de Nomoto, el cual se determina con la expresión (5.24)

$$\frac{\dot{\psi}}{\delta} = \frac{b}{s+a}, \quad (5.24)$$

donde  $\dot{\psi}$  es la velocidad angular del vehículo, y  $\delta$  es el ángulo del timón. Para poder determinar el valor de  $b$  y  $a$ , se introduce una entrada escaló con un ángulo de 0.61 rad. y se obtiene una respuesta semejante a la de una de primer orden, ver Figura 5.44.

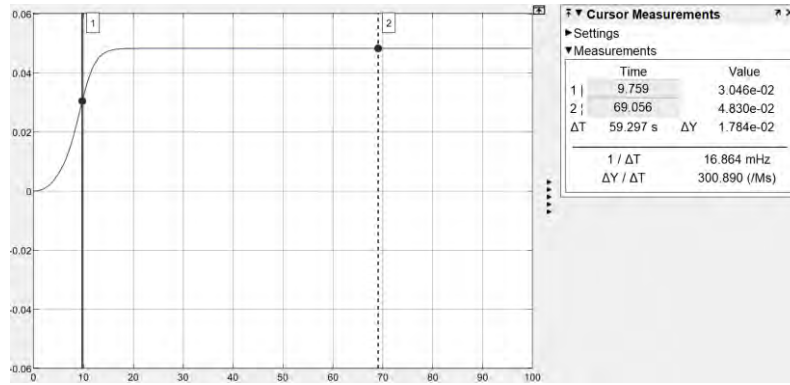


Figura 5.44 Respuesta de sistema a ángulo de timón

Por consiguiente, se termina los valores con las expresiones (5.25)

$$b = \frac{\psi_{ss}}{\delta_{pulso} T_s} = \frac{0.0483}{(0.61)9.734} = 0.081, \text{ mientras que} \quad (5.25)$$

$$a = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{9.734} = 0.1027.$$

Luego, se define el espacio de estados, con un vector de estados de  $[\psi, \dot{\psi}]$ , el cual se expresa como (5.26) y (5.27)

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} [\delta], \quad (5.26)$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}, \quad (5.27)$$

donde la entrada es el ángulo del timón y la salida es la posición angular del vehículo. A partir del cual, se realiza el diseño de un controlador por realimentación de posición y velocidad angular del vehículo, junto a un integrador. Tal como se muestra en la Figura 5.45, debido a que el componente proporcional, en la realimentación del ángulo, alinea el vehículo al ángulo deseado. Mientras el componente derivativo obtenido con la realimentación de la velocidad angular, agrega robustez al controlador al amortiguar según la velocidad del giro y ayuda ante variaciones del sistema como velocidad, inercia, entre otros. Por último, el componente integrador influye en los errores estacionarios por perturbaciones que aparecen en la navegación marina como corrientes, vientos, etc.

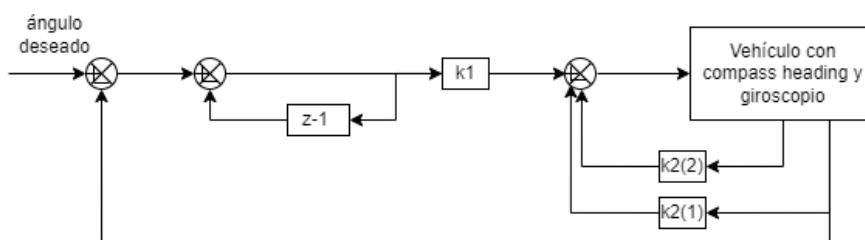


Figura 5.45 Diagrama de controlador con realimentación e integrador

En primer lugar, como el controlador se diseñará en discreto, se termina el periodo de muestreo el cual será la décima parte del tiempo pico de la respuesta deseada, la cual se dispone con un

tiempo de establecimiento de 50 s y un sobreimpulso máximo de 2%. Con lo cual, se obtiene un tiempo pico de 22 s, por lo cual el valor del periodo de muestreo se determina como 1s. Luego, se pasa las matrices del espacio de estados a discreto, obteniéndose los valores de A y B, ahora denominados G y H, en la expresión (5.28)

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0.9504 \\ 0 & 0.9024 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.003915 \\ 0.007698 \end{bmatrix} [\delta], \quad (5.28)$$

Luego, se determina las matrices en lazo abierto, para verificar controlabilidad, las matrices se determinan como (5.29)

$$GN = \begin{bmatrix} G & H \\ \text{zeros}(1,2) & 0 \end{bmatrix} \text{ y } HN = \begin{bmatrix} \text{zeros}(2,1) \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5.29)$$

Así, se verifica la controlabilidad al ser determinada con un valor de 3. Finalmente, se determinan los polos deseados, con los parámetros deseados planteados, obteniendo como polos dominantes,  $z_1 = 0.9212 + 0.0593i$  y  $z_2 = 0.9212 - 0.0593i$ , mientras el polo no dominante se determina como,  $z_3 = 5 * \text{real}(z_1) = 0.6703$ .

Los cuales son menores a la unidad, por lo tanto son estables. Luego, empleando ackerman, se hallan los valores de  $K_1$  y  $K_2$ . Los cuales resultan (5.30). En simulación, se genera el esquema observado en la Figura 5.46 en Simulink.

$$K_1 = 7.38 \text{ y } K_2 = [46.6514 \ 0.4163] \quad (5.30)$$

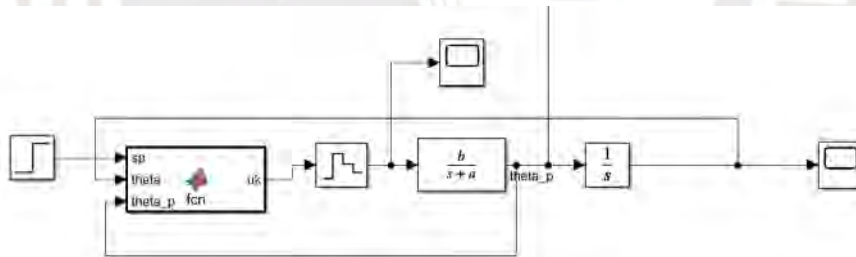


Figura 5.46 Esquema de simulación en Simulink

En la Figura 5.47 se observa la respuesta del controlador y planta con un *setpoint* de 0.5 rad para la posición angular del vehículo. Tal como se esperaba, el tiempo de establecimiento es de aproximadamente 50 s con un reducido sobreimpulso.

Finalmente, se examina el giro del timón realizado por el controlador y que ingresa a la planta, pues este no debe tener picos mayores a 0.61 rad pues este es el máximo ángulo del timón. Tal como se observa en la Figura 5.48, la posición angular del timón llega a un máximo de 0.45 rad, para generar la respuesta deseada.

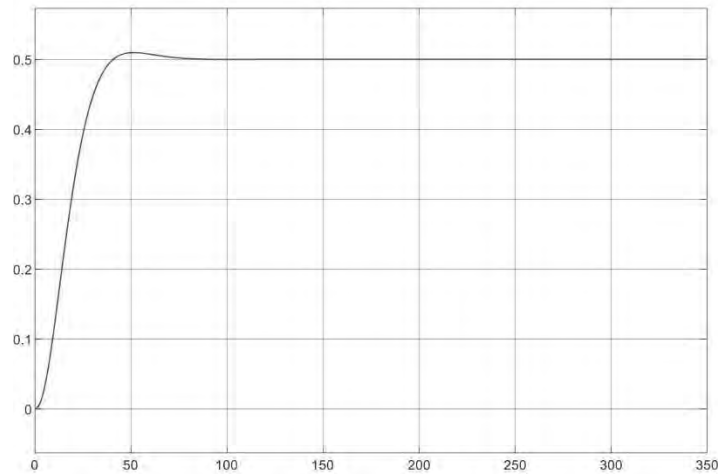


Figura 5.47 Posición angular vehicular frente al ángulo deseado de 0.5 rad

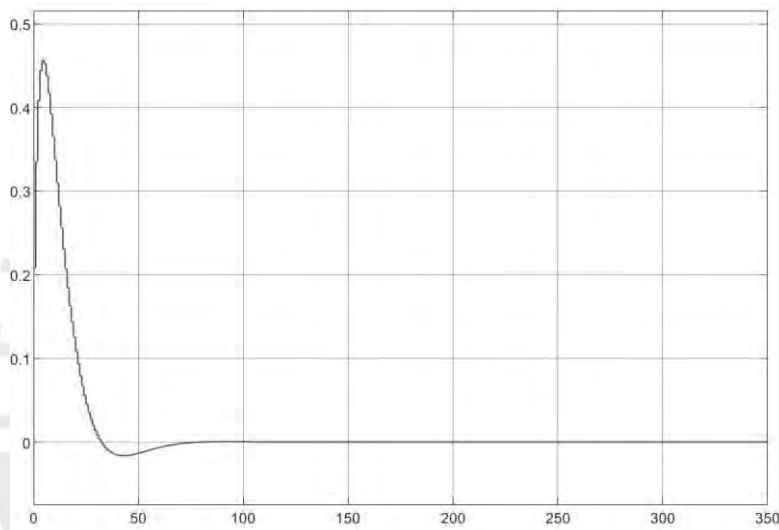


Figura 5.48 Posición angular del timón para la respuesta deseada

### 5.6.3 Controlador de movimiento para evasión de obstáculos

Para el control de movimiento para evasión de obstáculos se empleará el controlador para la orientación diseñado, junto con un controlador de velocidad a partir de aproximación de modelo a uno de primer orden, de la expresión (5.31)

$$\frac{u}{f} = \frac{b}{s + a} \quad (5.31)$$

donde  $u$  es la velocidad de largada del vehículo (*surge*), y  $f$  es la fuerza de propulsión que suman los propulsores del vehículo. Para el control de este se implementa un PID, tal como se muestra en el esquema de la Figura 5.49, este controlador fue escogido debido a la dinámica del vehículo más complejo al ser un trimarán y considerando la inclusión de un filtro kalman para la obtención de mediciones de la velocidad angular, se puede mejorar respuestas al considerar el cambio de la velocidad con la inclusión del derivador, junto al proporcional para regular la respuesta e integrador para las perturbaciones.

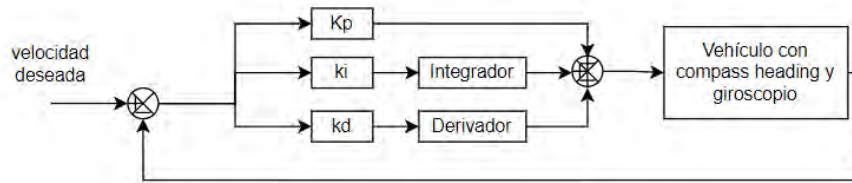


Figura 5.49 Controlador de velocidad

Así, se plantean en primer lugar los polos deseados los cuales se relacionan con la respuesta dinámica deseada, para lo cual se coloca como deseable a un sobreimpulso menor al 2%, con un tiempo de asentamiento menor a 4 s. Por lo tanto, los polos deben ser los de la expresión (5.32)

$$s_1 = -1.0000 + 1.3644i \text{ y } s_2 = -1.0000 - 1.3644i \quad (5.32)$$

Por lo tanto, la ecuación característica debe ser la de la expresión (5.33). Así, sea  $C$  la función de transferencia del controlador,  $H$  la planta estimada de primer orden. La función de transferencia en lazo cerrado, se determina con la expresión (5.34).

$$(s - s_1)(s - s_2) = s^2 + 2 * s + 1.4654 \quad (5.33)$$

$$FT_{L,C} = \frac{CH}{1+CH}, \quad (5.34)$$

Luego, resolviendo en función de  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$ , se obtiene la expresión (5.35). Por lo cual, tras un proceso de pruebas se determina los valores para las constantes  $k_p = 2.8254$ ,  $k_i = 7.6$  y  $k_d = 4.2966$ , para los valores de  $b = \frac{0.2315}{6*2.875}$  y  $a = \frac{1}{2.872}$ , obtenidos gráficamente de la respuesta de la velocidad ante un escalón de 6 N de propulsión.

$$(k_d b + 1)s^2 + (a + b k_p)s + k_i b \quad (5.35)$$

Así, como respuesta del controlador de velocidad se obtiene la Figura 5.51, donde se aprecia un sobreimpulso de menos de 2% y un tiempo de respuesta de 4s.

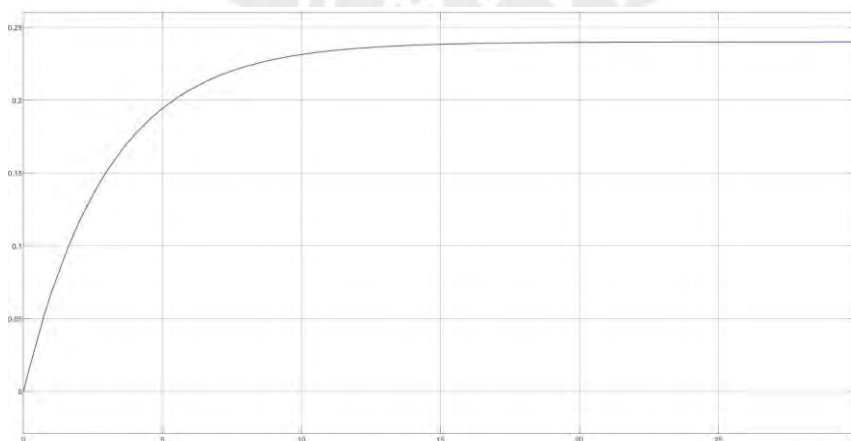


Figura 5.50 Respuesta de velocidad lineal frente a escalón de propulsión

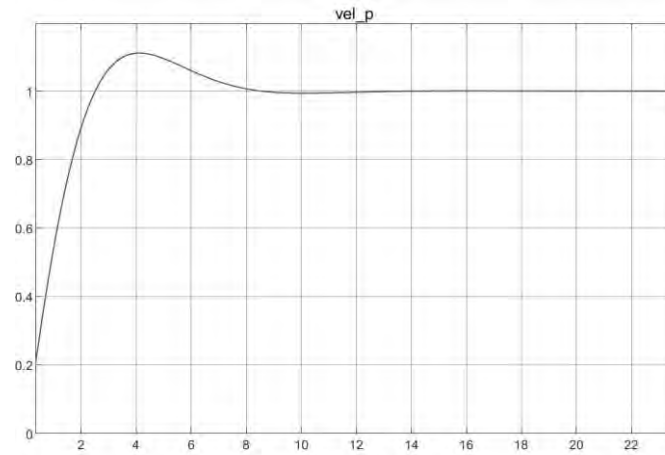


Figura 5.51 respuesta del controlador de velocidad

Cabe precisar que, para el correcto funcionamiento de ambos controladores, cuando sean empleados en conjunto deben aplicar con un pequeño desfase, lo cual provee de mejor establecimiento de la velocidad y orientación deseada. Así, la velocidad se determinará primero al tener más rápida respuesta. Además, se debe mencionar que el tiempo de muestreo del controlador es menor, pues su respuesta es más rápida, por lo cual empleará 0.01 para cada actualización, pues se sigue la regla de la expresión (5.36)

$$T_s < \frac{T_r}{10}. \quad (5.36)$$

## CAPÍTULO VI: Diseño del subsistema de monitoreo

En el presente capítulo, se estructurará y compondrá los diferentes subsistemas de monitoreo, empezando con el de cetáceos, seguido del zooplancton y por último, el monitoreo de variables oceanográficas con la temperatura, conductividad, pH y oxígeno disuelto.

### 6.1 Monitoreo de cetáceos

#### 6.1.1 Cálculo de arreglo horizontal de hidrófonos

Para poder diseñar la separación del arreglo horizontal, se debe examinar la frecuencia de los objetos de estudio acústico, en este caso nos referimos a las ballenas jorobadas, azules y demás personajes, tal como se aprecia en la Tabla 6.1. Allí, se observa además la longitud de onda obtenida bajo la expresión (6.1), donde emplea la más alta frecuencia a detectar. Por lo cual, se elige trabajar con la longitud de onda de la ballena jorobada, pues como se explicará más adelante, la distancias entre hidrófonos debe ser menor a la mitad de la longitud de onda; y debido a que la frecuencia máxima de la ballena azul es baja, la longitud es amplia; lo cual implica mayor largo de arreglo y problemas para la detección de ballenas jorobadas.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (6.1)$$

Tabla 6.1 Tabla de rango de frecuencias de emisor de interés

Emisor	Frecuencias	Longitud de la onda
Ballena jorobada	80 a 1000 Hz	1.5
Ballena azul	10 a 40 Hz	37.5
Embarcaciones	5 a 1000 Hz	1.5
Pistolas sísmicas	10 a 300 Hz	5

Para verificar el comportamiento del arreglo de hidrófonos, se evalúa el patrón de haz del arreglo, en general este concepto describe la respuesta a una apertura acústica en función de la dirección. Para los hidrófonos, el patrón de haz está en función de phi y theta, y es el voltaje (vrms) producida por un arreglo de respuesta unitaria cuando el sonido en unidad de presión incide en la dirección de phi, theta. Así, se puede distinguir en un patrón 3D y 2D, donde el primero está en función del ángulo *azimuth phi* y ángulo de elevación *theta*,  $b(\phi, \theta)$ . Mientras que el patrón 2D existe tanto en el plano xy, en función del ángulo azimuth  $b(\phi)$ , como en el plano xz, donde está en función del ángulo  $b(\theta)$ .

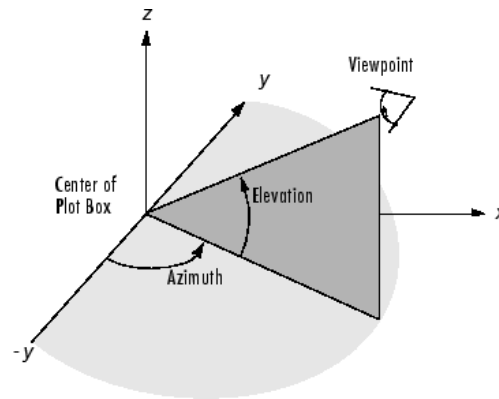


Figura 6.1 Gráfico de ángulos del patrón de haz 3D  
Fuente: (Mathworks)

Para analizar la posibilidad de disminución de ruido, se debe evaluar la directividad (DI), pues es un reflejo de la ganancia de señal sobre ruido. Así, mediante pruebas, un arreglo continuo (con separación menor a  $\frac{\lambda}{4}$ ) a lo máximo puede llegar a proveer de aproximadamente 4 dB con 15 hidrófonos, mientras que con un arreglo distante se puede obtener mayor atenuación con menos hidrófonos. Sin embargo, el peligro de esto es el enredamiento con los tipos de redes y métodos de pesca que se llevan a cabo en el litoral. Por ella se examinaron qué métodos de pesca se realiza en la zona, ver Anexos A.10. Donde, el método de pesca más alarmante para el vehículo es la cortina animalera, pues la red presenta una altura de aproximadamente 50 metros y se emplea mayormente en las isóbatas de 60 metros a más. Así, se debe diseñar un arreglo que aun si se sumerge verticalmente, no se pueda enredar en los métodos de pesca. Por lo cual la profundidad, en caso de no haberse detectado las boyas no debe ser mayor a 5 metros.

Primero se prosigue a escoger la distancia entre los hidrófonos en el arreglo para poder alcanzar una considerable directividad, la cual será un buen indicador de la ganancia del arreglo. Como se mencionó anteriormente, se decide utilizar la longitud de onda de la ballena jorobada con la longitud de onda de la Tabla 6.1. Así, siendo la longitud de onda definida por la ecuación (6.2), donde  $c$  es la velocidad del sonido en el agua y  $f$  es la frecuencia en la que se diseñará, el cual pertenece a la máxima de la ballena jorobada. Luego, para evitar el *antialiasing*, la separación entre los hidrófonos debe cumplir con la igualdad (6.3),

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{1500 \frac{m}{s}}{1000 \text{ Hz}} = 1.5 \text{ m, luego} \quad (6.2)$$

$$\Delta y < \frac{\lambda}{2} = 0.75 \text{ m} \quad (6.3)$$

Tras varias examinaciones de directividad con respecto a distancia y cantidad de hidrófonos, se opta por una separación de hidrófonos de 0.4 m, con una cantidad de 8 hidrófonos. En total,

se presenta una longitud de 2.8 m. La cual debe ser adecuada para asumir un rango de campo lejano (*Far-Field*) por la ecuación (6.4) ya que, si el arreglo es mayor junto a la longitud de la onda, esto necesitaría un procesamiento de conformación de haces del campo cercano.

$$FF \geq \frac{L^2}{\lambda} = \frac{2.8^2}{1.5} = 5.23 \quad (6.4)$$

Tabla 6.2 Parámetros de arreglo

Características	Valores
Longitud de arreglo	2.8 m
Número de hidrófonos	8
Distancia entre hidrófonos	0.4 m

### Directividad del arreglo

Una manera de estimar la ganancia del arreglo (AG) es mediante el empleo de la directividad (DI), esto es referencial pero es útil para estimar la relación de señal con ruido del arreglo frente a la relación de señal con ruido de un solo elemento. Debido a que en condiciones ideales donde la coherencia de la señal de interés es 1, se cumple que la ganancia es igual a la directividad. Luego, tal como se observa en el patrón de radiación del arreglo en la Figura 6.2 con los parámetros de la Tabla 6.2, se aprecia una directividad de 6.47 dB.

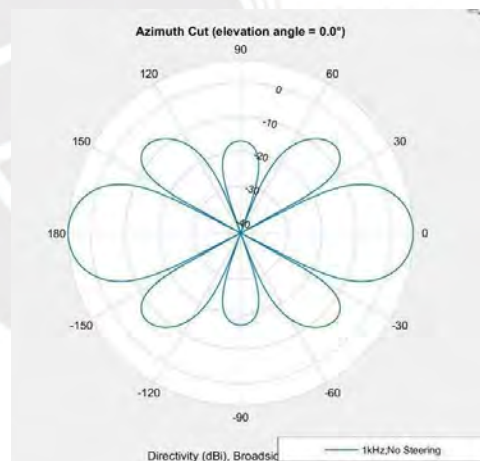


Figura 6.2 Patrón de radiación del arreglo

Otro parámetro a evaluar es el ancho del haz a media potencia (HPBW), pues este indica el ángulo dentro del cual la energía es mayor al 50% en el haz principal del patrón de radiación. Usando la herramienta de *array sensor analysis* de Matlab, se obtiene que el arreglo sin ninguna ventana es de 24.10°, sin embargo aplicando una chebyshev, se reduce los haces laterales y se aumenta el HPBW a 31.06°, ver Figura 6.3.

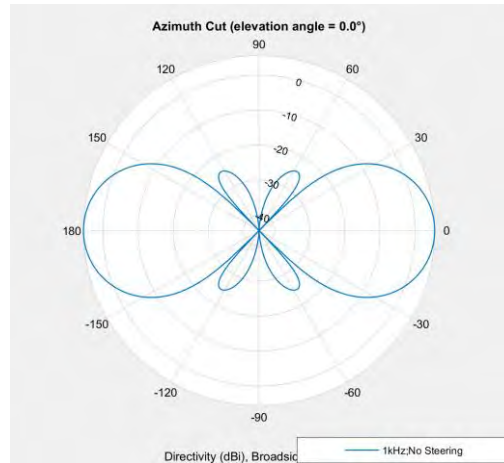


Figura 6.3 Patrón de haz con ventana

### 6.1.2 Diseño del subsistema de monitoreo acústico

#### *Diseño de arreglo de hidrófonos*

Se decide por un arreglo lleno de aceite el cual permite una flexibilidad de diseño que permite brindar el cambio y continúa evaluación de los componentes del arreglo. Para el diseño del arreglo, se empieza con la elección del hidrófono que emplea el arreglo, el cual se basará en cilindros piezoeléctricos del tipo Navy Type II, el cual es usado para aplicaciones pasivas acústicas, y cuya sensibilidad depende de su tamaño.

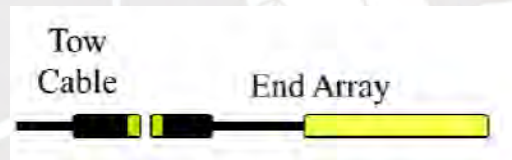


Figura 6.4 Esquema de arreglo  
Fuente: (NOAA)

#### *Selección de hidrófono*

En cuanto al transductor, se escoge diseñar un hidrófono pasado en dos cilindros acoplados en serie, pero conectados en paralelo, y aislados por tapones de PVC (*end-cap*), con una estructura adecuada para lograr una alta sensibilidad en un monitoreo acústico de ballenas (Schinault, 2020). El hidrófono es de longitud 28 mm, diámetro 25.4 mm con encapsulado a base de poliuretano (PU). Este método de fabricación se realiza para proteger los cilindros de daños físicos y agua ingresante, mientras que aún permite la entrada de la energía acústica sin reflexión, pérdida o distorsión. Así, este arreglo posee una sensibilidad de -187 dB re 1  $\mu$ Pa y una frecuencia de resonancia de 50 kHz. Lo cual está de acuerdo con lo requerido, pues el rango de frecuencias a detectar es desde 10 a 4000 Hz máximo.



Figura 6.5 Hidrófono de 2 cilindros acoplados en serie  
Fuente: (Schinault, 2020)

### *Diseño de pre-amplificador para cada hidrófono*

Según la guía para construcción de arreglo de hidrófonos (NOAA, 2013), se recomienda el diseño del preamplificador el cual convertirá las señales del cilindro PZT a un nivel mayor de voltaje junto a un filtrado básico para poder luego entrar al convertidor analógico digital.

En la Figura 6.6, se representa la primera etapa del “filtro pasa alta” (solo amplifica a partir de una frecuencia) y amplificación con el componente INA110, el cual se escoge para eliminar la necesidad de coincidencia de impedancia de entrada y tiene alto rechazo al modo común (CMRR), basándose en el trabajo realizado experimentalmente con el arreglo de hidrófonos y donde incluye sus características electrónicas (Schinault, 2013).

En primer lugar, el hidrófono es modelado como una fuente de corriente ( $I_s$ ), en paralelo con su capacitancia ( $C_p$ ), y su resistencia ( $R_p$ ). Así, se diseña el primer “filtro pasa alta”, con la elección de las resistencias  $R_4$  y  $R_5$  con las propiedades del hidrófono, ver circuito en la Figura 6.8. Se elige la resistencia de  $20M\Omega$  basándose en la expresión (6.5), donde la resistencia del hidrófono es  $500M\Omega$ , la capacitancia es  $650Pf$  y la frecuencia barrera debe ser menor a  $10Hz$ , ya que esta es la mínima para las ballenas azules y a partir de esta a menores es donde se genera ruido de vibraciones y por la capa límite del fluido.

$$f_L = \frac{1}{2\pi(R_p \parallel R_4)(C_p \parallel 1)} \Rightarrow \frac{1}{2\pi(500M\Omega \parallel 20M\Omega)(650pF \parallel 1)} = 9.8 Hz \quad (6.5)$$

Por otro lado, se debe definir la ganancia del amplificador, lo cual se define colocando una resistencia entre el pin3 y 12,13,11 y 16, la cual su valor se obtiene de la siguiente expresión (6.6), según *datasheet* del componente. Así, como se desea una ganancia de  $40dB$ , se coloca una resistencia de  $1k\Omega$ .

$$R_G = \frac{40k\Omega}{G - 1} - 50\Omega \quad (6.6)$$

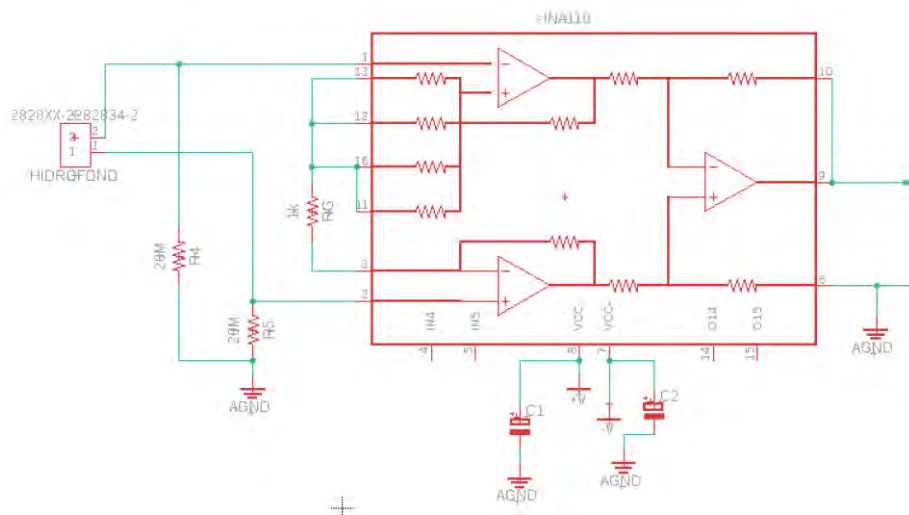


Figura 6.6 Primera etapa de amplificación

Luego, se prosigue a diseñar un filtro pasa alta con la arquitectura de Sallen-Key filtro pasa alta, tal como se aprecia en la Figura 6.7, se trata de un filtro de segundo orden. En primer lugar se define  $C_A = C_B = C$ , y radio de resistencia,  $m$ . Así, para definir la frecuencia de corte, se sigue la ecuación (6.7).

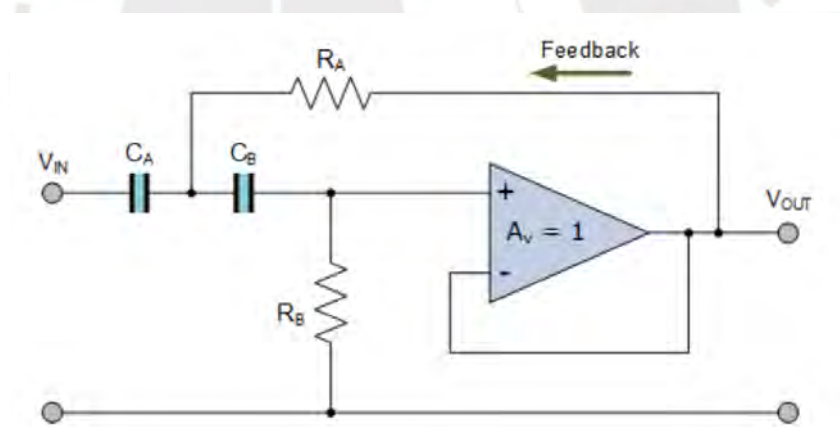


Figura 6.7 Filtro pasa alta con arquitectura Sallen Key

Fuente: Electronics Tutorial

$$\frac{R_B}{R_A} = m ; f_c = \frac{1}{2\pi R_A C \sqrt{m}} \quad (6.7)$$

Además el factor de magnificación,  $Q$ , se define como  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ , pues así se logra que la respuesta no tenga alta sensibilidad en la zona de corte y el filtro sea estable en esta zona, tal como se aprecia en la Figura 6.8. De esta manera, de la ecuación (6.8) que define a  $Q$ , se puede obtener el valor de  $m$ , donde se debe también colocar la ganancia unitaria deseada.

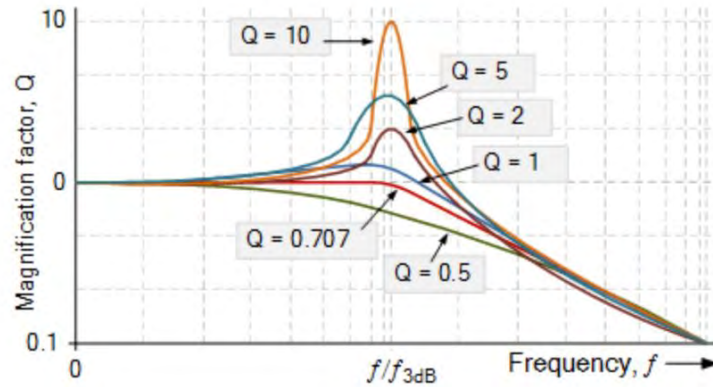


Figura 6.8 Comportamiento del filtro según valor del factor de magnificación  
Fuente: Electronic-Tutorial

$$Q = \frac{\sqrt{m}}{2 + m(1 - K)}, m = 2 \quad (6.8)$$

Como se desea que los condensadores sean estables a pesar de cambios de temperatura, el tipo de condensador debe ser COG NPO, por lo cual se elige que el condensador sea de  $0.1 \mu\text{F}$  (TECHNOBOTSONLINE), al ser el máximo valor encontrado en este tipo (MOUSER.COM). Como consecuencia para lograr una frecuencia de corte menor a 10 Hz, se necesita un valor de resistencia  $R_A$  120 k $\Omega$ . Por lo tanto, la resistencia  $R_B$  debe ser lo más cercano a 240 k $\Omega$ , por lo que se elige 270 k $\Omega$ . Lo cual lleva a un radio  $m$ , de 2.25, con un factor de magnificación 0.75, y hará al filtro adecuado a la aplicación. Por último, se elige como opamp al modelo OPA2211-EP con un bajo ruido junto a una operación de precisión, para obtener el diagrama observado en la Figura 6.9.

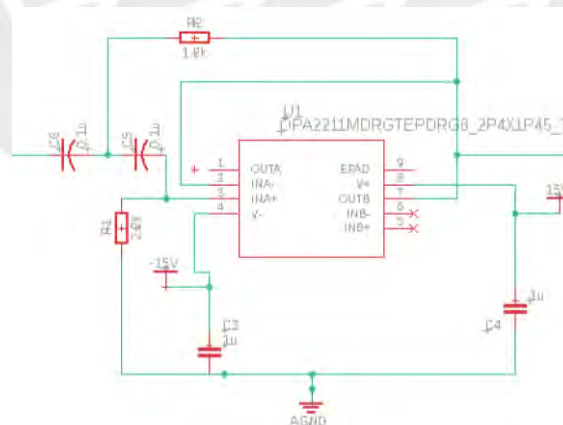


Figura 6.9 Circuito de filtrado con Opamp OPA2211-EP

Luego, se debe entrar a una etapa donde se convertirá la señal en una diferencial para poder ser transmitida sin mayores pérdidas, ni distorsiones. Por lo cual se debe elaborar un circuito tal como se observa en la Figura 6.10, donde se observa el circuito de una sola entrada con salida de dos señales diferenciales con el Opamp AD8476 completamente diferencial, el cual se ha elegido pues el voltaje de trabajo de los demás Opamps es de 15V, por lo cual no se puede

elegir otros que a pesar exigen un bajo consumo de energía, su máximo voltaje de consumo es de 5 V.

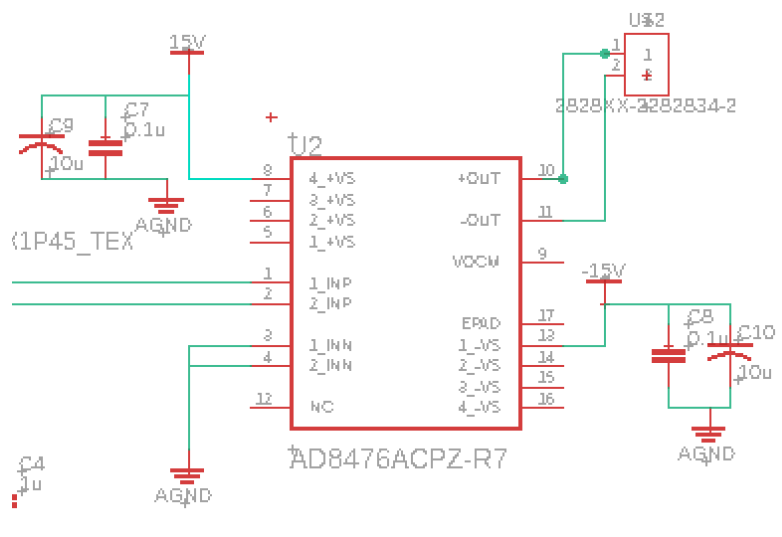
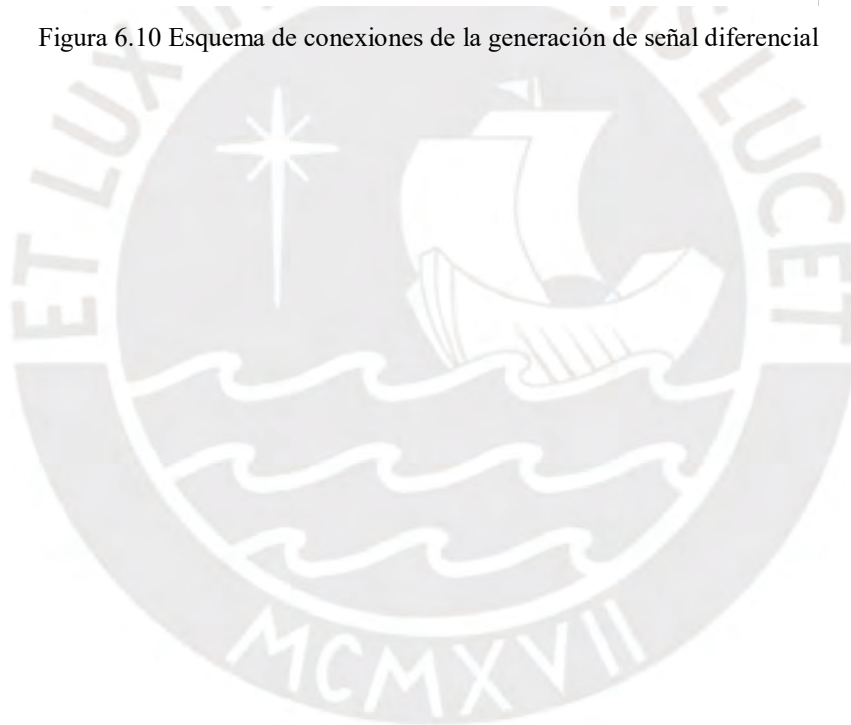


Figura 6.10 Esquema de conexiones de la generación de señal diferencial



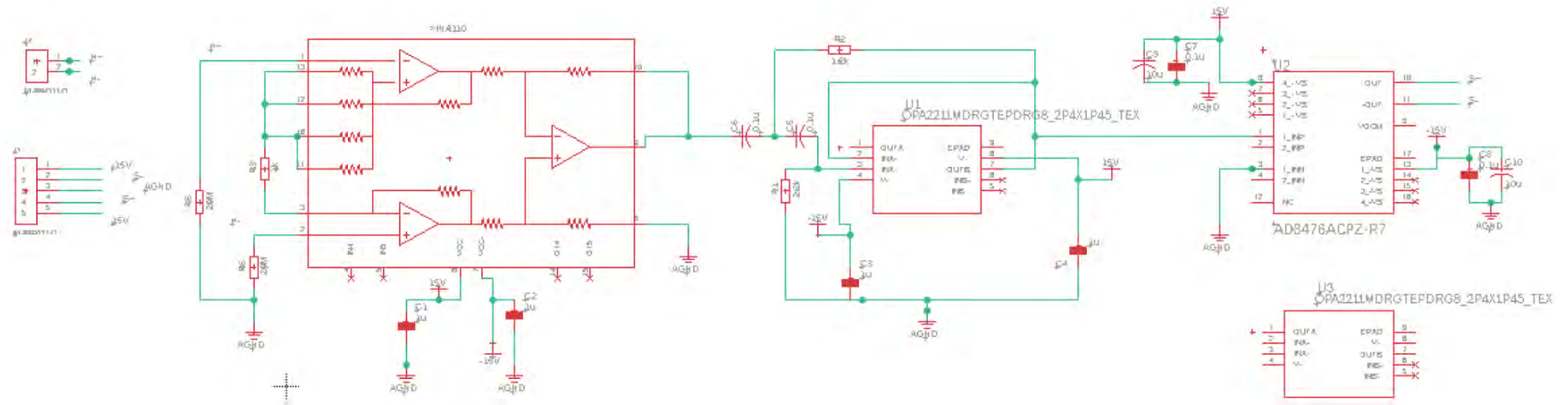


Figura 6.11 Esquema del pre-amplificador para cada hidrófono

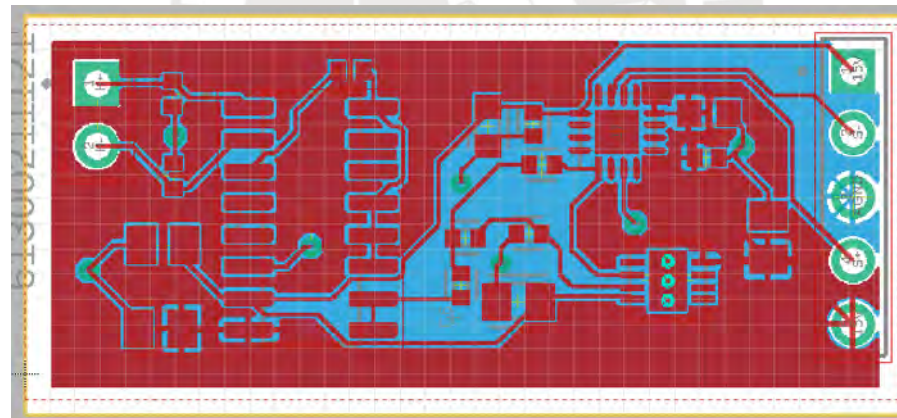


Figura 6.12 Pre-amplificador para cada hidrófono en EAGLE

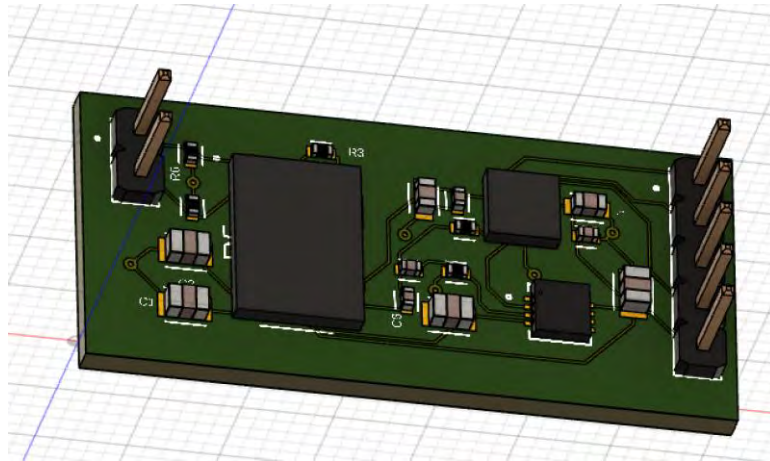


Figura 6.13 Pre-amplificador para cada hidrófono en Fusion

### *Convertidor analógico digital*

Luego del diseño del pre-amplificador de cada hidrófono, sus salidas analógicas diferenciales deben dirigirse al convertidor analógico digital. Primero, se debe decidir la frecuencia de muestreo junto a la profundidad de bits para decidir la arquitectura del ADC. Como se desea la mayor definición, se elige 24 bits de resolución para el ADC con una frecuencia de muestreo de 100 kHz. Así, la arquitectura de ADC que cumple con estos requerimientos es el de sigma-delta, pues normalmente se usa para gran profundidad de bits y con frecuencias de muestreo considerablemente menores. Además, como el rango luego del pre amplificador es  $-1, 1V$ , el ADC debe ser configurado en este rango de voltaje con mínimo 8 entradas. Para estos requerimientos, se elige el convertidor analógico digital PCIE-1803-AE, mostrado en la Figura 6.14.



Figura 6.14 ADC PCIE-1803-AE  
Fuente: Advantech.ru

Luego de la elección, es necesario verificar la mínima presión sonora detectable (SPL min), el cual se ve influenciado por la profundidad de bits del convertir y es una de las razones para elegir una mayor cantidad de ellos. Entonces, se prosigue a calcular la mínima presión con la expresión (6.9), empleando el valor del menor voltaje resoluble (SRV) influenciado por la

cantidad de bits reales tras la pérdida por ruido (ENOB), el factor de ganancia (G) y sensibilidad (Sh) del hidrófono.

$$SPL_{min} = 20 \log \frac{SRV}{V_{ref}} - G - S_h = 20 \log \frac{43.5 \text{ mV}}{V_{ref}} - 40 \text{ db} - (-187 \text{ dB}) \quad (6.9)$$

Obteniéndose un  $SPL_{min}$  de 59.76 dB. Lo cual es aceptable y adecuado para la aplicación.

#### *Tubo de Poliuretano y aceite*

Se elige el tubo de poliuretano flexible y resistente al agua Tygon, con un diámetro interior de 1 1/4" y exterior de 1 5/8", tal como se aprecia en la Figura 6.15.



Figura 6.15 Tubo Tygon  
Fuente: (SAINT GOBIAN )

Mientras que el aceite del interior debe ser de aceite de ricino, el cual se emplea en la acústica submarina como un medio de transferencia entre el agua y el hidrófono. Debido a que la impedancia acústica de este es similar al del agua, lo cual se observa con la expresión de esta en (6.10); lo cual atribuye a que proporcione menos reflectancia.

$$Z = \rho c \quad (6.10)$$

$$r = \left[ \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right]^2 \quad (6.11)$$

Tabla 6.3 Propiedades de los componentes del arreglo

Medio	Densidad	Velocidad del sonido
Agua	1029	1500
Aceite de ricino	961	1515

#### *Cable de conexión entre arreglo y vehículo*

Se ha elegido el cable CRE14222 para transportar todos los datos de comunicación, tal como se aprecia en la Figura 6.16. Donde se posee 12 pares disponibles de cables 20 AWG con aislamiento de polietileno.

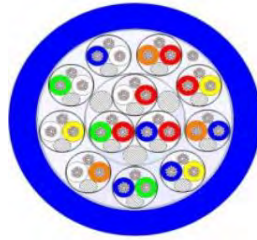


Figura 6.16 sección de cable para comunicación  
Fuente: (Cre-marine)

En el siguiente diagrama de conexiones se puede apreciar la composición y estructura del arreglo de 8 hidrófonos propuesto.

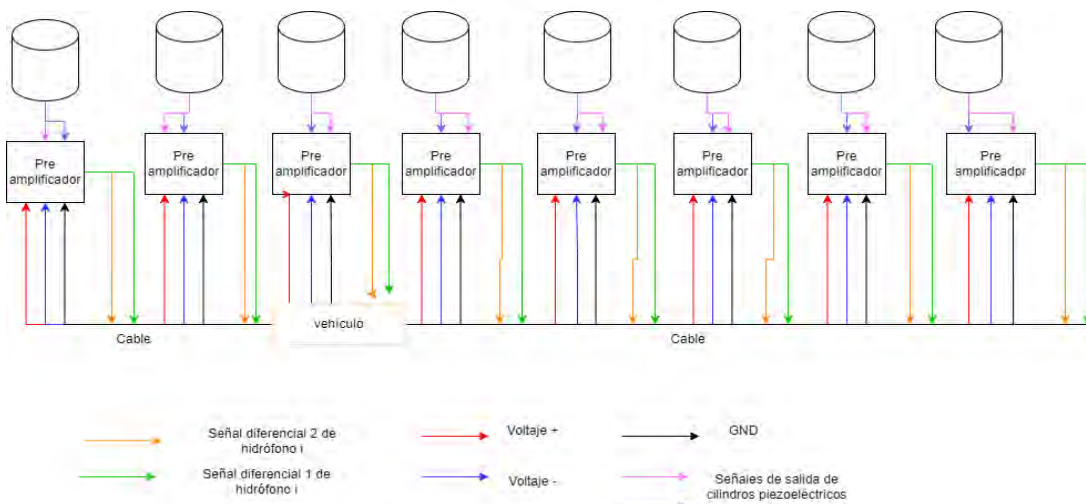


Figura 6.17 Diagrama de conexiones

Para poder conectar el cable de comunicación antes descrito con el tubo de poliuretano y los hidrófonos internos, se necesita un conector que pueda acoplarse con el cable que ampare las 8 señales diferenciales, con la señal de voltaje positivo, negativo y GND. Es decir, se necesita una cantidad mayor a 19 pines. El conector recomendado por la NOAA, es Teledyne MHDO. El cual es usado para conexiones submarinas y resistentes a este entorno marino remoto.

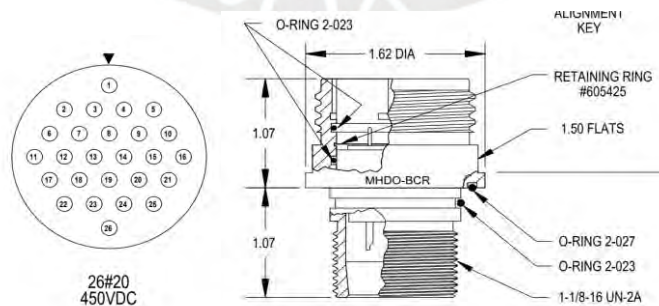


Figura 6.18 Dimensiones de conector MHDO con cabeza de 26 pines para cables 20 AWG  
Fuente:( Teledyne)

Así, se escoge el arreglo de pines mostrado en la Figura 6.18 el cual sería suficiente para abastecer las 19 líneas. Además, en la Figura 6.19, se muestran las dimensiones del acoplamiento recomendado por la empresa.

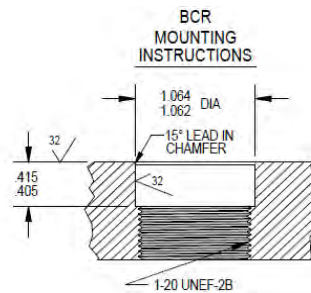


Figura 6.19 Dimensiones del acoplamiento recomendado por la empresa  
Fuente:( Teledyne )

Luego, en la Figura 6.20, se presenta el modelado del conector, al cual se le debe poder colocar dos cables de acero de tensión, los cuales se encargarán de proporcionar soporte a los hidrófonos internamente del tubo de poliuretano. Por ello, se coloca un “anillo de tensión” basado en el diseño de NOAA, ver Figura 6.21.

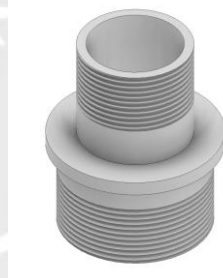


Figura 6.20 Modelado conector MHDO

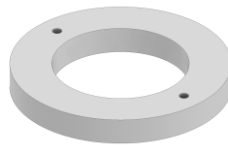


Figura 6.21 Anillo de tensión

Luego, es necesario un adaptador entre el conector y el tubo de Tygon para poder realizar el sellado con tubería termorretráctil revestida con adhesivo. Además, debe existir una abertura para el llenado de aceite, el cual debe poder cerrarse al culminar, mediante un tornillo/tapón de llenado de aceite, ver Figura 6.22. En la Figura 6.23, se puede apreciar el modelado del adaptador diseñado, para encajar con la parte roscada del conector MHDO y además presentar una rugosidad adecuada para el acople con el tubo de poliuretano, mediante un roscado de tuberías.



Figura 6.22 Tapón de llenado de aceite  
Fuente: (GOLD-PLUG)

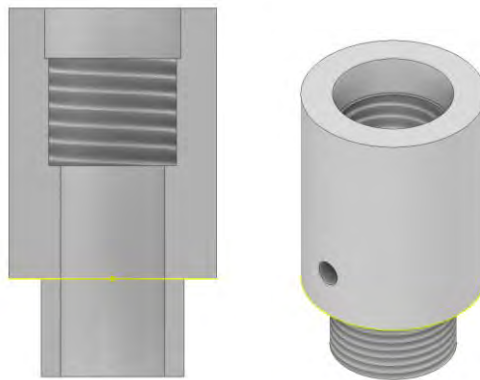


Figura 6.23 Modelado del adaptador entre conector MHDO y tubo Tygon

Para asegurar el sellado entre el tubo y el adaptador, se debe emplear un sellado con una tubería termoretráctil revestida con adhesivo, mencionado anteriormente, ver Figura 6.24. El acople final del conector, anillo, adaptador, tubo y el sellado termoretráctil, se aprecia en la Figura 6.25.



Figura 6.24 Tubería termoretráctil  
Fuente: (Ancor)

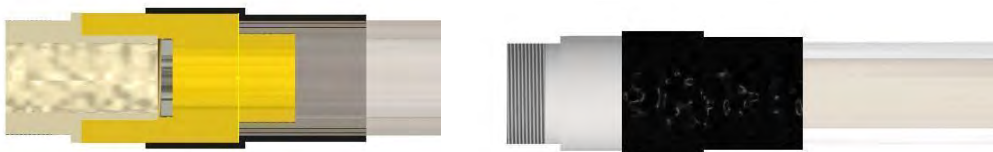


Figura 6.25 Acople Final

Por último, se diseñan soportes para los cilindros piezoeléctricos, a los cuales debe sujetarse y sostenerse de los dos alambres que recorren todo el tubo desde el conector MHDO, ver Figura 6.26. Los cuales se ajustan al hidrófono mostrado en la Figura 6.27.

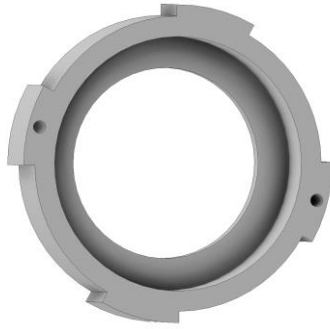


Figura 6.26. Soporte de hidrófonos

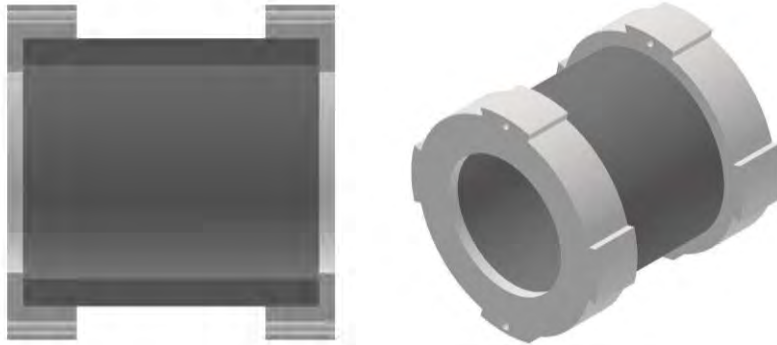


Figura 6.27 Cilindro Piezoeléctrico con soportes

Para el preamplificador, también es necesario primero un tubo de cobre, revestido con una tubería termoretráctil y sostenidos con soportes que se sostienen de los dos alambres, antes mencionados. En la Figura 6.28, se muestra el soporte, y en la Figura 6.29, se muestra el preamplificador construido junto con una sección para detalles de la composición interior.

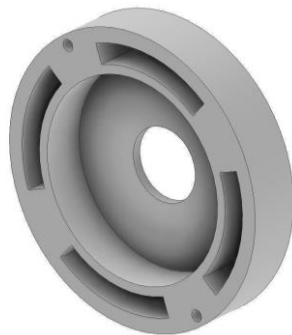


Figura 6.28 Soporte de preamplificador

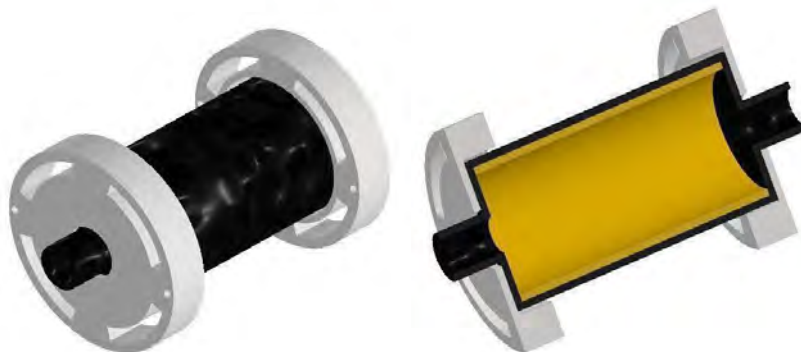


Figura 6.29 Preamplificador con soportes con tuberías

Así, se presenta la unión entre el hidrófono montado en soportes seguido del amplificador con soporte, ver Figura 6.30. Cabe señalar que se recomienda asegurar la posición del hidrófono empleando “botones de parada” de cobre zincado.

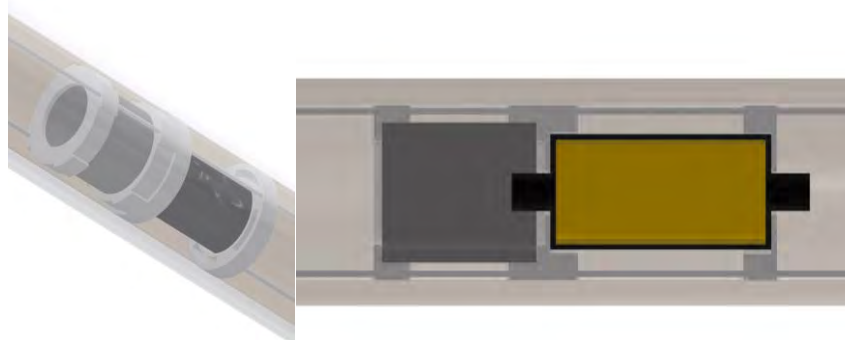


Figura 6.30 Unión de hidrófono y preamplificador con soportes y alambres

Por último, el arreglo se cierra con un tapón de tubería inoxidable, ver Figura 6.31. El cual está preparado para asegurar su acoplamiento con la tubería de poliuretano, de tal forma que se asegura que no filtre el aceite del interior.

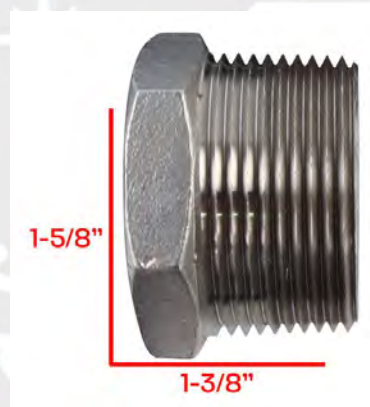


Figura 6.31 Tapón de tubería  
Fuente: (CP performace)

Para su unión con la subunidad sumergida, se emplea un prensaestopa M32 con espiral de acero inoxidable, el cual cumple la función de sostener al arreglo de su cable en la parte inferior de la subunidad sumergida, junto a que alivia la tensión en ella y evita la formación de un ángulo recto durante la navegación.



Figura 6.32 Unión de cable de arreglo mediante prensaestopa espiral

### 6.1.3 Etapa de preprocesamiento

Debido a la existencia de ruido en las grabaciones causados por el fluido, y mecanismos de la subunidad sumergida, se decide emplear la normalización de energía por canal (PCEN). La cual se presenta como una alternativa a la transformación logarítmica del espectrograma de frecuencias MEL, con beneficios de suprimir el ruido del fondo y enfatizar señales de primer plano. Es por ello, que se emplea en aplicaciones de señales de larga distancia, como la detección acústica (Bello et al. 2019).

La normalización consta de 3 etapas principales, la primera consiste en una integración temporal, la cual filtra cada subbanda de frecuencias en la señal con un filtro que trata de estimar la intensidad del ruido, tratando de mantener la intensidad de la señal. Para lo cual se define el filtro IIR de primer orden  $\phi_T$ , cuya respuesta a  $R[f, t]$ , la señal entrante es (6.12)

$$M[f, t] = (R * \phi_T)[f, t] = (1 - s) * M[f, t - \tau] + s * R[f, t]; \quad (6.12)$$

donde se tiene que definir el parámetro de constante de tiempo ( $\tau$ ) que afecta el filtro autorregresivo  $\phi_T$ , en su frecuencia de corte. Y por consiguiente, el valor de la constante ( $s$ ) se determina a partir de  $\tau$  pues se relacionan con la expresión (6.13)

$$s = \sqrt{1 - \cos\left(\frac{2\pi\tau}{T}\right)} \left( \sqrt{3 - \cos\left(\frac{2\pi\tau}{T}\right)} - \sqrt{1 - \cos\left(\frac{2\pi\tau}{T}\right)} \right) \quad (6.13)$$

Para el caso de la aplicación se recomienda una constante de tiempo,  $T$  de 1 s y la constante  $s$  de 0.25 (CARTWRIGHT, 2018). La siguiente etapa es un control de ganancia adaptable (AGC), y acoge el resultado de la estimación del nivel del ruido en el proceso previo, para adaptar la ganancia en el denominador de la expresión (6.14)

$$G[t, f] = \frac{R[t, f]}{(M[f, t] + \varepsilon)^\alpha}; \quad (6.14)$$

Se escogen los valores  $\varepsilon = 0.001$  cerca a 0 y  $\alpha = 0.8 < 1$ , de tal forma que convierte el ruido en gaussiano, blanco, aditivo, etc; los cuales no afectan a las redes convolucionales en su desempeño (Cartwright, 2018). Por último, se prosigue con una etapa de compresión en el rango dinámico (DRC) donde se agrega un *bias*, luego una potenciación, tal como se observa en la expresión (6.15)

$$PCEN[t, f] = (G[t, f] + \delta)^r - \delta^r; \quad (6.15)$$

donde  $\delta$  se define con un valor de 10 debido a que se trata de un entorno ruidoso, sobre todo en bajas frecuencias, mientras  $r$  con un valor de 0.25 al tratarse de aplicaciones en exteriores (Cartwright, 2018).

Finalmente, empleando el lenguaje de programación *python*, se obtuvieron los siguientes resultados en dos de las muestras más ruidosas de la ballena jorobada y azul, ver Figura 6.33 y 6.34. En las cuales, se observa que se logra reducir el ruido presente, así como resaltar los cantos de las ballenas. Por consiguiente, se preparará el dataset con la cual se entrenará y verificará una Resnet-50 pre entrenada.

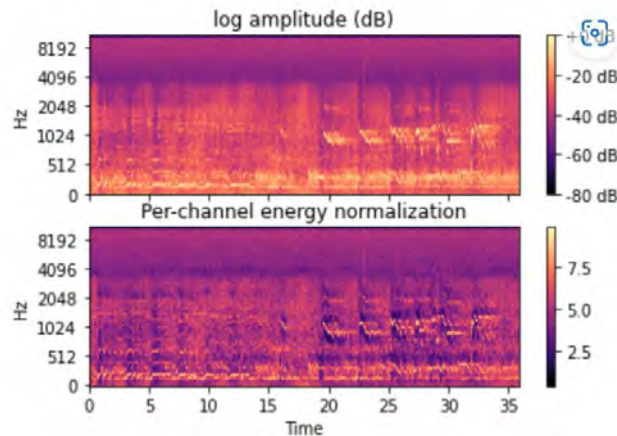


Figura 6.33 Comparación de espectrograma normal y con PCEN para ballena jorobada

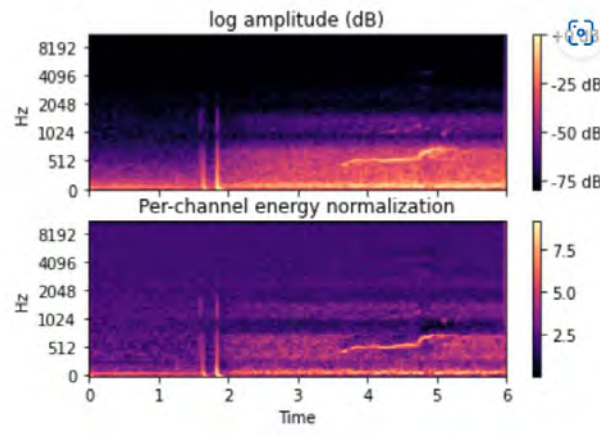


Figura 6.34 Comparación de espectrograma normal y con PCEN para ballena azul

#### 6.1.4 Detección de cetáceos mediante RESNET-50

En primer lugar, se prepara un *dataset* de espectrogramas de cada ballena jorobada y azul, las cuales se obtienen principalmente de la base de datos *Watkins Marine Mammals Sound Database* fundado por *WHOI Marine Mammal Center*; y de otras grabaciones de acceso libre. El proceso de preparación consistió en una separación de las grabaciones en extractos de máximo 3 segundos. Luego, se verifica que la data presente suficiente ruido para considerar que es tomada en el entorno, es decir eliminar el filtrado que muchas de las fuentes aplican. Tal como se observa en la Figura 6.35, muchas de las muestras presentan un tratamiento previo, sin embargo, con fines de entrenar una red más robusta, se le aplica ruido extraído de otras grabaciones.

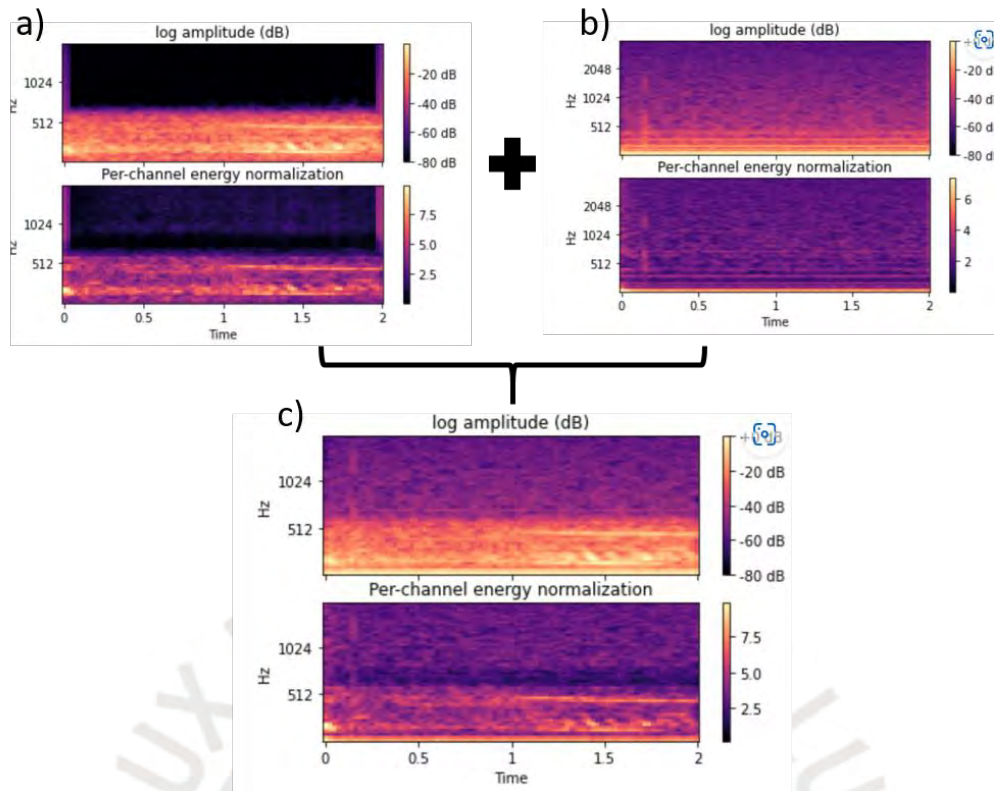


Figura 6.35 Integración de ruido en los extractos de dataset

Luego, se aplica la canalización de energía previamente explicada (PCEN), al extracto, con lo que se finaliza con una generación de imagen del espectrograma. Este proceso, se sigue para las grabaciones obtenidas, finalizando con una cantidad de 119 espectrogramas por cada clase de ballena. Mediante el uso de *google Colab*, se divide el *dataset* obtenido en 90% para entrenamiento y 10% para validación, con un tamaño de imagen de 224 x 224, un tamaño de *batch* de 32. Así, se obtienen 215 archivos para entrenamiento y 23 para validación. Algunas de las muestras se observan en la Figura 5.36.

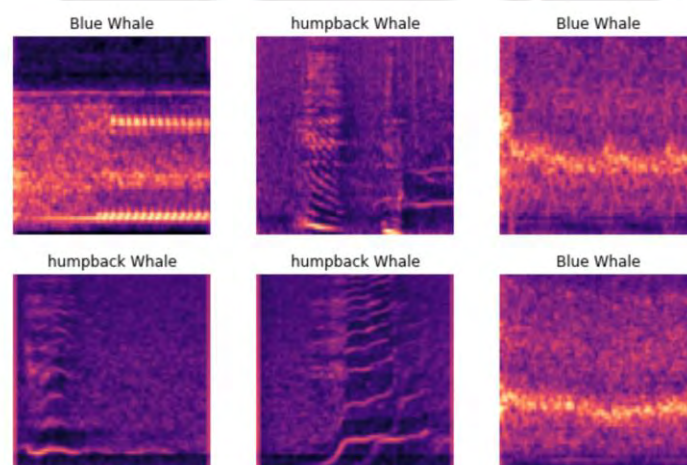


Figura 6.36 Muestras del dataset de cantos de ballena azul y jorobada

Luego, se sigue un proceso de transferencia de aprendizaje, el cual se aprecia en la Figura 6.37. Consisten en una inicialización de un modelo secuencial al que se le carga los pesos de la red pre entrenada y disponible RESNET-50, los cuales se congelan para entrenamiento. Luego, pasa por un proceso *flatten*, que consiste en aplanar las salidas. Seguido, ingresa a una línea de unidades o neuronas de 512, cada una de las cuales pasa por la función de activación Relu. Por consiguiente, entran a la última etapa de 2 unidades, lo cual corresponde a las dos clases a identificar de Ballena Jorobada y Azul, junto a una función de activación de Softmax.

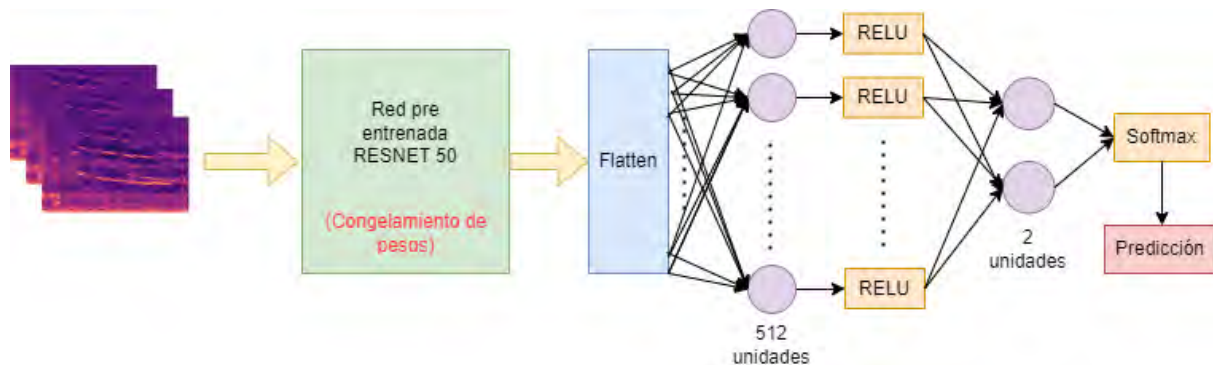


Figura 6.37 Diagrama de proceso de transferencia de aprendizaje

Por consiguiente, se obtiene que de los 24,637,826 de parámetros, solo se entrenan 1,050,114 parámetros. Así, se escoge un optimizador Adam para el entrenamiento, el cual consistió en 4 epochs con un ritmo de aprendizaje 0.001. Mientras que se emplea un Batch Gradient Descent como algoritmo de reducción para la función de costo, dado de que se trata de un dataset muy pequeño y se quiere evitar pesos influidos por el ruido de la data. Como resultado, fue variando la precisión del modelo en el entrenamiento y validación, tal como se muestra en la Figura 6.38, obteniéndose como precisión final 0.9714.

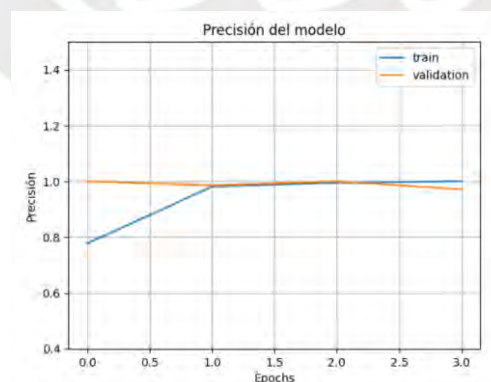


Figura 6.38 Gráfica de precisión del modelo en entrenamiento y validación

Finalmente, para conocer el comportamiento del modelo ante data variante y obtener una perspectiva de la efectividad en su empleo. Se realiza un k-fold cross-validation, con un dataset de 280 espectrogramas de la ballena azul y ballena jorobada, se reentrenar a la RESNET-50

obtenida con cada subset, bajo los mismos parámetros de su primer aprendizaje mencionado, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 6.4 Resultados de entrenamiento por partición (fold)

Separaciones	Precisión de test
Fold 1	0.6857
Fold 2	0.7143
Fold 3	0.9857
Fold 4	0.5
Promedio	0.7214

En conclusión, el modelo muestra una robustez considerable ante la variación de la data, tomando en cuenta la cantidad de data reducida empleada para su entrenamiento. Ante ello, es posible su aplicación en la detección de ballenas en entorno real, pero bajo un nuevo entrenamiento con data extraída en el área a implementar para incrementar robustez y precisión.

## 6.2 Monitoreo de zooplancton

### 6.2.1 Componentes del mapeo de distribución

Una de las variables importantes a considerar en la temperatura a la que será expuesto el ecosonda, pues en la zona entre norte de la Libertad y sur de Piura, se encontró que la temperatura varía a lo largo de la profundidad como de la distancia de la costa. Sin embargo, se puede observar una variación sobre todo en el cambio de temporada entre primavera a otoño de entre 15 a 23 °C, lo cual puede implicar variación en las velocidades de trabajo de las ondas usadas por el ecosonda. Pues la velocidad del sonido puede variar en 4.5 m/s por la variación de sólo un grado.

#### *Definición de parámetros*

Debido a que se trata de aguas con profundidad máxima de 200 m, las frecuencias típicas son mayores de 200 kHz debido a que como se mencionó anteriormente con este rango de frecuencias es suficiente para que la onda cubra la longitud de la columna. Además, para el caso de la búsqueda de mapeo de zooplancton la frecuencia debe ser mayor al límite determinado.

#### *Duración de pulso*

La duración de pulso del ecosonda,  $\tau$ , se define como el valor de tiempo que le costará a la onda recorrer la profundidad deseada. Aquel, se calcula con la expresión (6.16), donde  $d$  es la distancia y  $c$  es la velocidad del sonido bajo el agua. Luego, se prosigue a hallar la velocidad

del sonido, considerando la influencia de la temperatura, salinidad y profundidad, empleando la fórmula de Mackenzie (6.17).

$$\tau = \frac{2d}{c} \quad (6.16)$$

$$c(D, S, T) = 1448.96 + 4.591T - 5.304 * 10^{-2}T^2 + 2.374 * 10^{-4}T^3 + 1.340(S - 35) + 1.630 * 10^{-2}D - 1.675 * 10^{-7}D^2 - 1.025 * 10^{-2}T(S - 35) - 7.139 * 10^{-13}TD^3 \quad (6.17)$$

De la fórmula (6.13), usando valores de temperatura, T de 15 °C pues en esta profundidad máximo puede llegar a este valor, y salinidad, la cual es fluctuante entre la influencia de ACF y ASS, pero puede aproximarse por la latitud en 35.2 ppt. Se obtiene como valor de la velocidad 1510.49 m/s. Así, suponiendo que la ubicación máxima a la cual el zooplancton puede llegar durante el día, pues durante la noche las masas de zooplancton suben hasta la superficie, es de 200 m. La duración de pulso debe ser mínimo de  $\tau = 0.2648 \text{ s} = 265 \text{ ms}$  de duración para atravesar la columna de agua.

#### *Elección de frecuencia de muestreo*

Se define como 330 kHz, debido a que según investigaciones previas es adecuado para detectar a la especie *copépoda* en interés y va de acuerdo a la poca profundidad de las aguas, lo cual define al ancho de banda del transductor.

#### *Elección de la longitud de pulso*

Este determina la distancia mínima de detección que puede ser medida, así las especies más abundantes son los *copépedas*, las cuales se encuentran a menos de 40 m tanto día y noche, mientras otras especies durante la noche se elevan más. Así, eligiendo desde los 5 m mínimo de detección, la longitud de pulso debe ser de 7 ms mínimo. Así, se procede a elegir una longitud recomendada para agua poco profundas entre 0.2 ms a 0.5 ms.

#### *Elección de la velocidad del pulso*

La cual debe asegurar que un pulso retorne antes de emitir otro, por ello tomando las posibles mediciones a máximas profundidades en la zona definida, sería que se demora 0.2 s, lo cual implica 300 pulsos por minuto.

#### *Consideraciones para el receptor*

El ancho de banda del receptor se comprende entre,  $10 > W > 5.0311$ , y el factor de calidad del transductor se define en la ecuación, donde  $f_0$  es la frecuencia de máxima potencia de transmisión. A partir de esto, el ancho de banda (W) del transductor debe ser mayor a la del receptor.

$$Q = \frac{f_o}{W} \quad (6.18)$$

La presencia de movimientos, en cuanto a la orientación, no afecta cuando el transductor está alineado verticalmente con la medición del posicionamiento. Mientras que cuando los movimientos *roll* y *pitch* excede el ángulo del haz ( $\frac{\phi}{2}$ ), cuando el ancho del haz es pequeño, afecta significativamente en el error. Para calcular ancho del haz se basa en el siguiente cálculo para posiciones verticales, donde z max sería 200 m.

$$a = 2 \cdot z \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

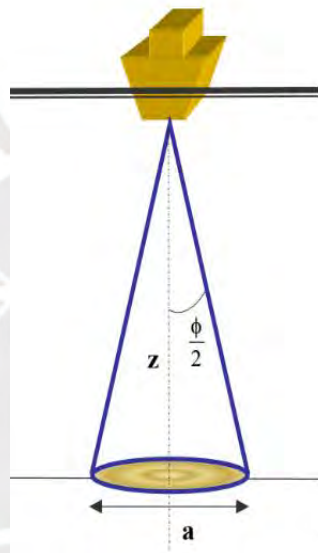


Figura 6.39 Gráfico de ancho de haz  
Fuente:( International Hydrographic Organization, 2011)

Considerando la longitud máxima del vehículo por lo menos a cinco metros de profundidad el ángulo del cono del haz debe ser menor a 1.5 m. Así, se define que debe ser menor a 33 °. Guiándonos por los parámetros descritos, se realiza una búsqueda comercial de los ecosondas posibles a usarse con las siguientes características:

- Frecuencia principal >200 , preferentemente 300 kHz o mayor
- Longitud de pulso 0.2 – 0.5 ms
- Velocidad de 300 pulsos por minuto
- Rango de frecuencias del transductor mayor a 10 Hz (depende del coeficiente)
- Ángulo del haz menor a 33°

Tras las posibles opciones expuestas en Anexo C.2, se elige el ecosonda WBT mini con el transductor de haz dividido ES333-7C, ya que presenta un reducido consumo energético (3 W) y un tamaño compacto y adecuado para la implementación en el vehículo (D: 14.5 cm W: 28.9

cm H: 12.7 cm). Mientras que su transductor, cumple con una frecuencia adecuada (333 kHz) para mapear correctamente el zooplancton en la zona a desarrollarse, junto a los requerimientos de máximo haz ( $7^\circ$ ) y longitud de pulso.



Figura 6.40 Ecosonda WBT mini con el transductor de haz dividido ES333-7C

Fuente: (Simrad)

### *Ruido eléctrico*

Los ecosondas presentan problemas con la interferencia del ruido eléctrico proveniente de la línea de abastecimiento de voltaje. Ante esta situación, se decide emplear un filtro de ruido electrónico que pueda atenuar el ruido que se presenta. Además, es preciso recalcar que debe existir un alejamiento de este equipo al cableado y ubicación física de los demás dispositivos electrónicos del sistema. El filtro escogido según el voltaje de trabajo de 12 V y el tipo de dispositivo, pues se trata del empleo de tranceptor en el que sus datos son sensibles, es *Power Conditioner Noise Filter PC-10* de la empresa *NewMar*. Cuyas características principales se aprecian en la Tabla 6.5.

### *Encapsulamiento*

Para la conexión del ecosonda con el casco principal, se debe diseñar un encapsulamiento con un material de bronce, pues por el material del casco, se recomienda plástico o bronce; sin embargo, por la forma del encapsulamiento recomendado por la empresa, se opta por el bronce. El componente se aprecia en la Figura 6.41 (derecha), donde ingresa el transductor, y se asegura empleando un anillo de sujeción, ver Figura 6.41 (izquierda).

Tabla 6.5 Característica de filtro de ruido

Modelo	PC-10
Aspecto	
Voltajes de trabajo	6-48V
Consumo de corriente	10 Amp
Tamaño	L:88.8mm A:76mm

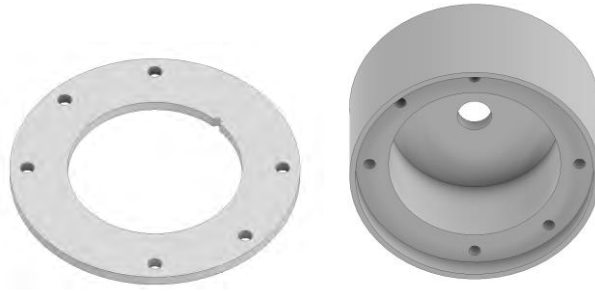


Figura 6.41 Anillo de sujeción (izquierda) y acoplador para encapsulamiento (derecho)

Para unirse al casco, tendrá dos agujeros roscados, ver Figura 6.38. Por lo tanto para prevenir el ingreso de agua en el casco al cual se debe emplear O-rings, para lo cual se calcula el diámetro interior ( $DI_{O-ring}$ ), empleando la expresión (4.28), se despeja el valor de  $DI_{O-ring}$ , mientras que para el diámetro interior del surco ( $DI_{surco}$ ) se decide un valor de 11 mm. Por consiguiente, para un apriete de 2% se obtiene un  $DI_{O-ring} = 10.78 \text{ mm}$ .

A partir de este valor, se elige el O-ring con las dimensiones de la Figura 6.42, donde también se define el diámetro exterior del surco. Mientras la profundidad de 19% se obtiene 1.215mm.

Size	CS (IN)	ID (IN)	OD (IN)	CS (MM)	ID (MM)	OD (MM)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="10.7"/>	<input type="text"/>
1.5X10.7	0.059	0.421	0.539	1.50	10.70	13.70

Figura 6.42. O-ring seleccionado

Fuente: (Marcorubber)

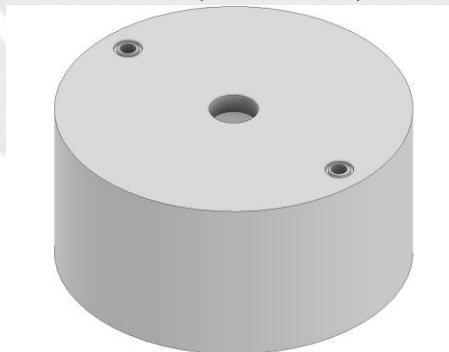


Figura 6.43 Agujeros roscados en encapsulamiento

Finalmente, se hace uso de la capacidad de la fibra de vidrio del casco para poder formar geometrías complejas, y se modifica para tener una superficie plana circular que puede alojar el encapsulamiento del transductor, ver Figura 6.44. Finalmente, el acople resulta como en la Figura 6.45.

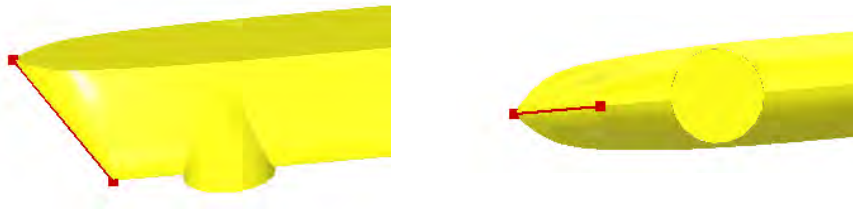


Figura 6.44 Forma del casco para el correcto acoplamiento

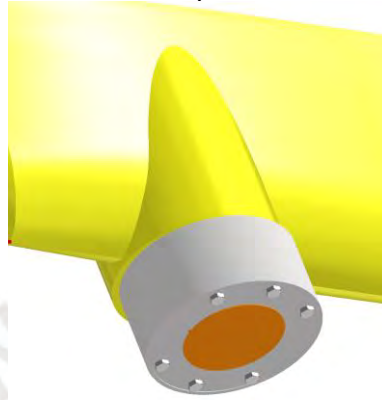


Figura 6.45 Acople final del transductor en casco principal

### 6.2.2 Procesamiento de datos de ecosonda

En primer lugar, el ecosonda debe ser calibrado siguiendo los estándares acústicos de pesca mediante el uso del método de esfera con unas de Carburo de wolframio de diámetro 38.1 mm y 22mm. Luego, el WBT mini presenta dos modos de empleo: modo EK80 y modo autónomo. El segundo presenta el inconveniente de que las operaciones dependen del procesador del WBT mini y el almacenamiento es en la tarjeta interna SD. Lo cual, ocasiona que la frecuencia de repetición del pulso sea 4s aproximadamente (Petersen, 2019), y presenta problemas para detectar zooplancton en agrupaciones de menor tamaño. Por ello, se decide usar el modo EK80, el cual debe ser ejecutado en un procesador y se encargará de guardar en tiempo real, los datos que pasan por un proceso de dos etapas de filtrado y submuestreo implementados por el *software* EK80, para luego ser guardados en formato de números complejos (Basett et al., 2017).

El proceso del procesamiento de datos se para en el empleo de la señal de voltaje tras la recepción del eco, a la cual se le realiza una correlación con la señal de voltaje transmitida, ver expresión (6.19)

$$cp_r(t) = k_{cp}v_r(t) \otimes v_t(t). \quad (6.19)$$

Donde se obtiene  $cp_r(t)$  es pulso comprimido de salida, y  $k_{cp}$ , la inversa de la función autocorrelación de la señal de voltaje transmitida  $v_t(t)$ . Por consiguiente, a partir del pulso

comprimido de salida, se determina el coeficiente del volumen de retrodispersión, en la expresión (6.20)

$$S_v(w) = \frac{\llcorner |CP_r^{vol}(w)|^2 \gg}{\llcorner |CP_{r0}^{cal}(w)|^2 \gg} \left| \frac{L^{cal}(w)}{L^{vol}(w)} \right|^2 \frac{\sigma_{bs}^{WC20}(W)}{V(w)} \quad (6.20)$$

Donde  $w$  es la frecuencia acústica angular, en este caso sería empleando 333 kHz;  $|CP_r^{vol}(w)|$  el valor absoluto de la transformada de Fourier del pulso comprimido de salida;  $|CP_{r0}^{cal}(w)|$  el valor absoluto de la transformada de Fourier del pulso comprimido de salida durante la calibración mencionada anteriormente;  $\sigma_{bs}^{WC20}(w)$  es la sección transversal de retrodispersión teórica y se basa en el tamaño de la especie a detectar y se puede determinar con la expresión (6.23);  $V(w)$  es el volumen sonoro en el rango de  $r_{vol}$  y está definido por la expresión (6.21).

$$V(w) = \frac{1}{2} c T r_{vol}^2 \Psi_D(w) \quad (6.21)$$

Donde  $c$  es la velocidad del sonido en el agua,  $T$  el tiempo de duración de la ventana después de la compresión de la señal y  $\Psi_D(w)$  el ángulo de haz equivalente. Luego,  $L^{cal}(w)$  y  $L^{vol}(w)$  representan la pérdida de transmisión para la calibración y la señal, atribuido a la absorción del agua y la dispersión esférica, se representa en la ecuación (6.22).

$$\left| \frac{L^{cal}(w)}{L^{vol}(w)} \right| = \frac{r_{vol}^2}{r_{cal}^2} 10^{\frac{2\alpha(w)(r_{vol}-r_{cal})}{20}} \quad (6.22)$$

Así, la sección transversal de retrodispersión se define a partir del modelo de esfera pasa alta (AOKI,1999), y se determina en la ecuación (6.23). Donde,  $a_e$  es el radio del objeto a detectar, lo cual se asume como la mitad de la longitud del copópeda interesado, de largo 2 mm;  $k$  es el número de onda en el agua y  $d$  se determina con la expresión (6.24) donde  $g$  es el contraste de densidad, mientras que  $h$  es el contraste de la velocidad del sonido en el agua.

$$\sigma_{bs}^{WC20}(w) = \frac{a_e^2 2 (ka_e)^4}{[2 + 3 (ka_e)^4]} d^2 \quad (6.23)$$

$$d = \frac{1 - gh^2}{3gh^2} + \frac{1 - g}{1 + 2g} \quad (6.24)$$

Finalmente, luego de determinarse los términos previamente descritos, se puede crear el ecograma tal como se puede apreciar en la Figura 6.46, sin embargo para ello se debe realizar calibraciones y obtener valores de expresiones del propio ecosonda para mostrar un ecograma.

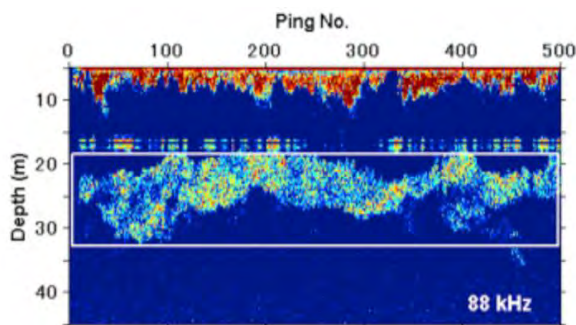


Figura 6.46 Ecograma de investigación de krill en Antártida  
Fuente: (Amakasu et al. 2017)

### 6.3. Monitoreo de variables oceanográficas

#### 6.3.1 Componentes para monitoreo de temperatura, pH, oxígeno disuelto y salinidad

Las variables oceanográficas a monitorear son la temperatura, conductividad, pH y oxígeno disuelto, las cuales son esenciales para modelar el entorno de las especies de ballena jorobada y azul, pues dan indicativo del estado de su entorno, así como da información de su comportamiento en este medio a ciertas condiciones. Así, se define los parámetros necesarios para que el componente electrónico requiere para funcionar en el ambiente dispuesto. Para el montaje, se emplea conectores para cables a través del casco, tal como se aprecia en la Figura 6.47.



Figura 6.47. Conector SeaChoice  
Fuente: (JamesTown Distributors)

#### *Sensor de temperatura y conductividad*

En el caso de la temperatura se requiere un rango entre  $-5$  a  $30$   $^{\circ}\text{C}$ , ya que la máxima temperatura es la superficial de  $18^{\circ}$ , sin embargo, puede haber zonas donde durante otoño (abril-junio) en la zona norte y centro, presente más intensificación de la CSPC (corriente subsuperficial Peru Chile), la cual en la parte norte se transporta agua cálida (ver Anexo). Así como una precisión  $\pm 0,1$ . Mientras que para la conductividad se recomienda para aplicación marítimas con rango  $0\mu\text{S/cm}$ –  $1\text{S/cm}$  con precisión  $\pm 2\%$ .

A partir de una comparativa en productos actuales del mercado, ver Anexos D.3, se decide elegir el sensor A7CTS-USB, debido a que posee un rango  $-23$ -  $45$   $^{\circ}\text{C}$  y  $0.5$ - $70$   $\text{mS/cm}$ , y precisión  $0.01$   $\text{mS/cm}$  Y  $0.01$   $^{\circ}\text{C}$ . Además, frente a todas las opciones presentadas, presenta un bajo costo con mínimas diferencias de precisión y que no afectan drásticamente a la necesidad de calidad de las mediciones.



Figura 6.48 sensor A7CTS-USB  
Fuente: (JFE)

A continuación, se presenta el soporte de aluminio anodizado en la Figura 6.49. Donde se aprecia que además posee surcos donde se atornillan con el adecuado sellamiento mediante O-ring de dimensiones iguales a las determinadas en el capítulo 4.3.4. Cabe precisar que, para evitar el movimiento axial durante el movimiento, se emplea caucho alrededor de la zona de sujeción. Finalmente, el acople final se aprecia en la Figura 6.50, donde se observa que el casco tendrá una forma adecuada para que el acople pueda ser sujetado mediante uniones atornilladas.



Figura 6.49 Acople de aluminio para sensor CT



Figura 6.50 Acople de aluminio del sensor CT

### *Sensor de pH*

De las características del entorno indagadas (Anexos A.3), se conoce que el entorno marino se encuentra entre el rango de 7-9 uu. Por lo cual se determina como rango este intervalo y se exige una precisión +/- 0.01.

En Anexos D.4, se presenta una comparación con tres productos presentes en el mercado, de los cuales se elige iSAMI-pH, ya que además de cumplir con los requerimientos. Es un producto de pequeño tamaño adecuado para la implementación en el vehículo. En la Figura 6.52, se aprecia el acople del sensor pH de aluminio, el cual también emplea una modificación de la forma en el casco para proveer de una superficie plana donde se pueda acoplar con él y se protege contra el ingreso de agua con O-ring de dimensiones determinadas en el capítulo 4.3.4. Además, emplea caucho en la zona de sujeción.



Figura 6.51 Sensor iSAMI-pH

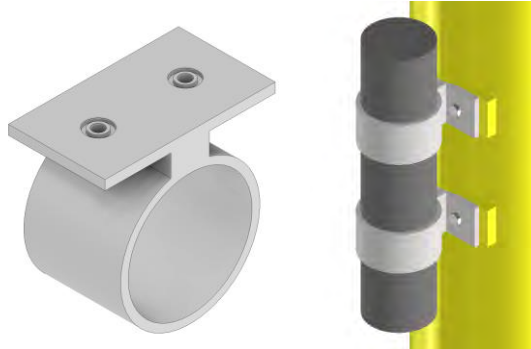


Figura 6.52 Acople de aluminio para sensor pH

### *Sensor de oxígeno disuelto*

Por último, por características del entorno se conoce que el oxígeno disuelto del mar presenta rangos normalmente entre 98-100 % o en otras unidades entre 1,0 – 8.5 ml/L. Además, se debe exigir una precisión de  $\pm 0.2$ . De las opciones existentes, ver Anexo D.5, se escoge el sensor RINKO-FT-CE ya que cumple con los requerimientos, presenta un bajo consumo energético comparado con los demás y su material es adecuado para aplicaciones marinas. Su acople con el casco sigue las mismas características que los anteriores sensores, con un soporte de aluminio, empleo de o-rings y caucho alrededor de la zona de sujeción, ver Figura 6.54.



Figura 6.53 Sensor RINKO-FT-CE  
Fuente: (JFE)

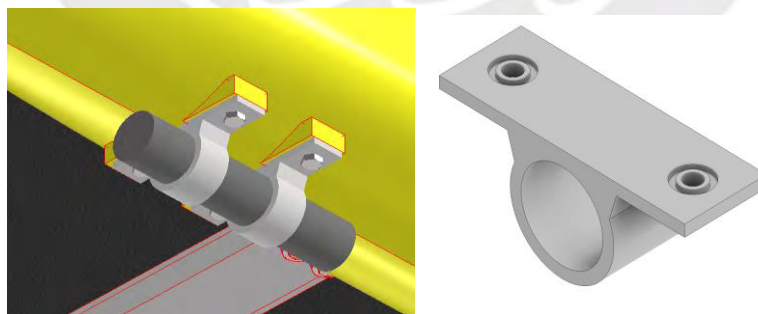


Figura 6.54 Acoplamiento de sensor DO

### *Procesador para monitoreo*

Para cumplir los requerimientos necesarios, el procesador encargado de recibir y almacenar en el caso de las variables oceanográficas y mapeo de zooplancton; mientras que para la detección de cetáceos debe pos-procesar, identificar y extraer características principales para luego transmitir satelitalmente. Así, las características son las siguientes:

- 4 puertos RS232
- 1 comunicación UART
- 1 ranura PCIe (168 x 100 mm (6.6" x 3.9"))
- 1 ethernet
- Procesamiento para la detección a base de Resnet empleando espectrogramas , lo cual implica 2.4 TOPS y 55FPS, lo cual implica empleo de GPU.
- Capacidad de memoria para un total 1.2 Tb ( mapeo zooplancton 600 Gb, CTD 128Mb, pH 100 Mb, OD 100 Mb e hidrófonos 512 Gb)

Se escoge la tarjeta Xavier AGX primordialmente por la capacidad de procesamiento de 20 TOPS, lo cual satisface la necesidad de ejecución del RESNET 50. Además, cumple con las ranuras de PCIe, para el ADC y la memoria a anexar.



Figura 6.55 Xavier AGX  
Fuente: (Nvidia)

#### *Memoria aparte en ranura PCIe*

Como memoria se escoge la HP-FX900, pues posee la capacidad necesaria para abastecer las grabaciones de la misión de 3 meses aproximadamente. Además, con su empleo el tiempo de grabación se acelera. Finalmente se conecta mediante un PCIe x4 de generación 4. Adecuado, para la tarjeta de procesamiento seleccionada previamente.



Figura 6.56 Memoria 1 TB HP  
Fuente: BIWIN

### 6.4 Arquitectura de hardware

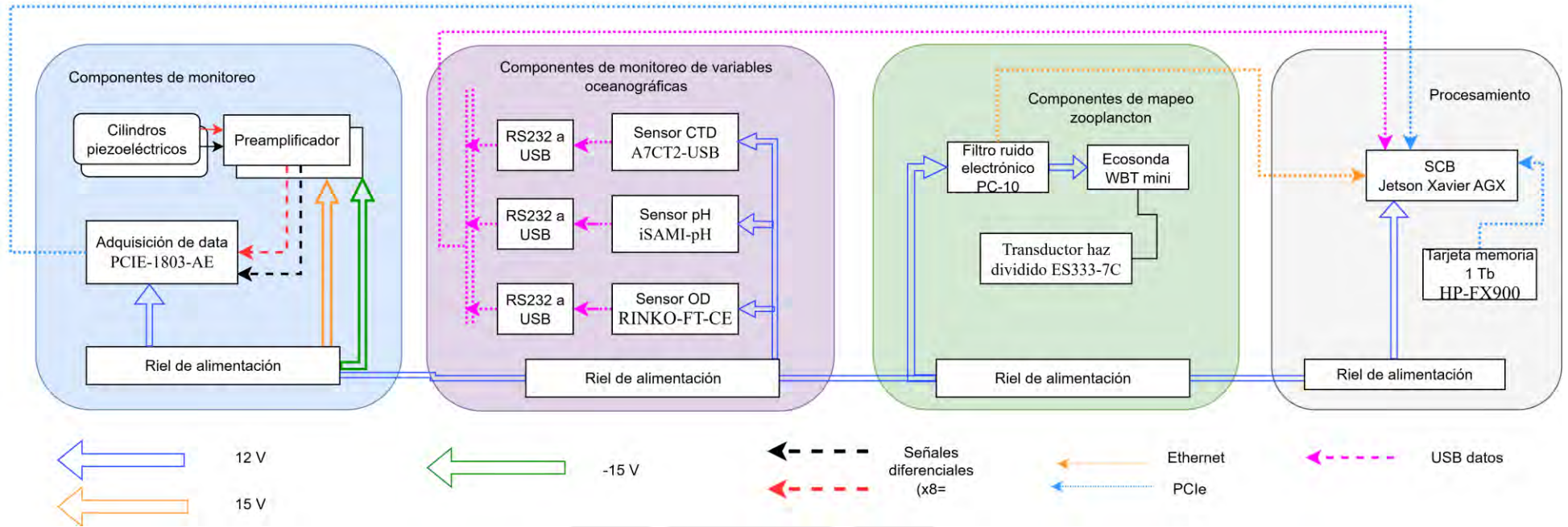


Figura 6.57 Diagrama electrónico del subsistema de monitoreo

## CAPÍTULO VII: Diseño del subsistema de energía, comunicación e interfaz

### 7.1. Subsistema de energía

Para abastecer de energía a los subsistemas descritos anteriormente, se necesitan 3 líneas de tensión diferentes a los 24 V que se obtendrán del sistema extractor de energía solar que se describe en la subsección 7.1.1. Las elecciones se realizan a base del consumo de amperaje que los sistemas requieren, y se encuentran en Anexos.

El servomotor del timón, debido a su elevado consumo de amperaje y su constante uso para la dirección del vehículo, necesita estar constantemente abastecido y alimentado del sistema de energía de recarga. Por lo cual, se usará un convertidor. Mientras que los demás componentes del sistema de navegación sin radar y junto a la comunicación remota llegan a consumir en conjunto un máximo de 4.16A. Por otro lado, agrupando, los componentes de monitoreo junto al radar, el consumo máximo es de 3.84 Amps. En total, se escoge 3 convertidores de 24 - 12 V Orion cada uno con un amperaje nominal de 5 Amp, eficiencia de 93% y tamaño reducido comparado con otras opciones Anexos D.8

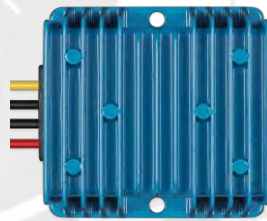


Figura 7.1 Convertidor Orion 24 – 12 V

Luego, se necesita un convertidor de 24V a 5V, para el componente de comunicación satelital, por lo tanto, se escoge un regulador comercial AMPUL que tiene como máxima corriente 3 A, con rango de entrada de voltaje de 4.5 a 24V, y de salida de 3-12 V.



Figura 7.2 Regulador de 24 a 5V AM2643  
Fuente (Ampul.com.eu)

En el caso de los preamplificadores se necesita voltajes de 15V y -15V, por lo que se emplea un regulador de doble salida, el cual tiene como salida un canal con +15V, y otro canal de -15V con capacidad de hasta 200 mA y 6W, ver Figura 7.3. El cual es suficiente para la alimentación de los preamplificadores, pues estos en total consumen un total de 0.24 W (ver Anexos B.14).



Figura 7.3. Regulador PQDE6W-Q24-D15-DIN  
Fuente: (Mouser)

Para el encendido se necesita un relé conectado a un interruptor para el encendido total del circuito. Mientras para el apagado de emergencia en condiciones de navegación, se deberá apagar el subsistema de monitoreo y actuadores; mas no el subsistema de navegación y comunicación satelital, debido a cuestiones de localización constante del vehículo hasta el retiro de este del mar. Por lo tanto, se realizará de manera digital mediante comunicación entre el procesador de navegación y monitoreo.

Para la activación se escoge el relé littelFuse, debido a que cumple con los requerimientos de operación en corriente (30 A max) y voltaje (12-900 VDC), presenta robustez. Luego, se añade un convertidor de 24 12 V, de bajo amperaje solo para la activación de los relés.



Figura 7.4 Relé littelFuse

### 7.1.1 Cálculos del arreglo de paneles

#### *Horas pico*

En primer lugar, se debe definir las horas pico del territorio, para ello se emplea el Sistema de Información Geográfica Fotovoltaico de la Comisión Europea. En la cual se ingresan los datos de latitud y longitud de lugar junto al ángulo de inclinación óptimo para obtener la información necesaria. Por ello, el ángulo óptimo se calcula con la siguiente expresión (7.1)

$$\beta_{inclinacion} = 3.7 + 0.69 |\alpha|, \quad (7.1)$$

donde  $\alpha$  es la latitud del lugar, la cual se puede estimar de todo el litoral a monitorear como -6.47. Así, se obtiene un ángulo de 16.39°; y se aproxima a 17°.

Luego, en el sistema se obtiene la gráfica de irradiación mensual en la Figura 7.5. A partir de la cual, se escoge la menor irradiación entre los meses Julio, Agosto y Septiembre. De los cuales, en Agosto de obtuvo una irradiación de 180.93 kWh/m<sup>2</sup>. Para determinar las horas pico, se emplea la expresión (7.2)

$$HPS = \frac{W}{\text{Cantidad de días}} = \frac{180.93}{31} = 5.84 \quad (7.2)$$

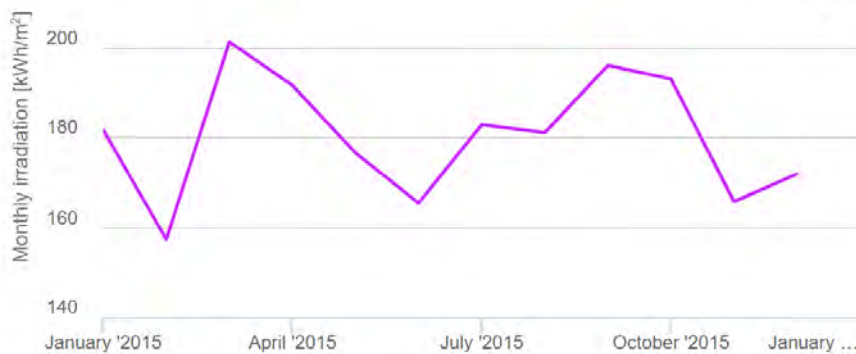


Figura 7.5 Radiación mensual

Para poder definir el arreglo de paneles necesarios, se debe conocer el consumo de energía por hora. Para lo cual se calcula el consumo energético por día del vehículo de superficie, en Anexos. Donde se calcula una cantidad de 2062W por día, con un factor de seguridad se considera un consumo de 2500 W por día.

#### *Número de paneles fotovoltaicos*

Para poder determinar la cantidad de paneles solares, se emplea la expresión (7.3)

$$N = \frac{E}{P \cdot HPS} \quad (7.3)$$

donde  $HPS$  son las horas pico y  $P$  es la potencia del panel solar. Por lo tanto, con paneles de potencia 200 W, se necesitan 2 paneles solares. Para determinar los paneles en serie se emplea la expresión (7.4), por lo cual se debe colocar dos paneles en serie y por lo tanto ninguno en paralelo.

$$N_{serie} = \frac{V_{sistema}}{V_{módulo}} = \frac{24 V}{12 V} \quad (7.4)$$

Para la instalación se colocará el panel solar sobre una plancha de policarbonato con silicona MSP. luego se coloca unos rieles o marcos de aluminio anodizado a los extremos los cuales se pueden adherir a la superficie de unión de embarcación con uniones atornilladas, ver Figura 7.8 y 7.9.



Figura 7.6 Panel solar flexible 12 V 200W

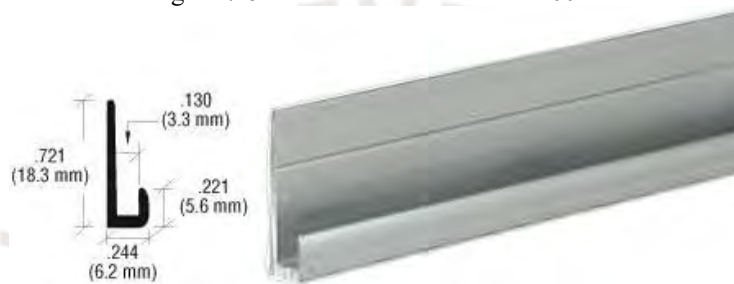


Figura 7.7 Canal J de aluminio



Figuras 7.8 Acople de policarbonato, panel y canal J

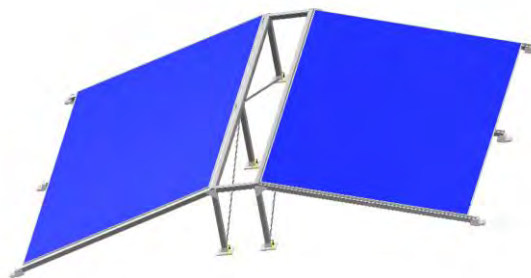


Figura 7.9 Modelado de estructura con paneles solares

### 7.1.2 Elección del sistema de recarga de baterías

Para determinar el amperaje por hora necesario para determinar las baterías a emplear se emplea la expresión (7.5)

$$\text{Capacidad (Ah)} = \frac{\text{Watts por hora consumida por día}}{\text{eficiencia de batería} \cdot \text{profundidad de descarga} \cdot \text{voltaje nominal de batería}}, \quad (7.5)$$

a partir del cual se determina que se necesita una capacidad mínima de 176.4 Ah . Por lo cual se elige las baterías LiFePo4 Victron, pues posee una capacidad de 200 Ah, presenta menor peso, de ciclo profundo, cargas más rápidas y menos pérdida de energía.



Figura 7.10 Bateria LiFePo4 Victron

### Regulador de carga

Para poder seleccionar el regulador de carga del sistema de paneles solares, se debe determinar la corriente que circulará por el generador fotovoltaico, lo cual se determina con la siguiente expresión (7.6)

$$I_{reg} = 1,25 I_{CCmf} N_{Pmf} = 1,25 * 12.05 * 1 = 15.06 A, \quad (7.6)$$

donde  $I_{CCmf}$  representa a la corriente cortocircuito del panel y  $N_{Pmf}$ , el número de paneles en paralelo, el cual es 1 . Así, se obtiene un valor de 15.06 A. Luego, se determina el voltaje máximo que el regulador debe soportar, mediante el empleo de la expresión (7.7)

$$V_{m\acute{a}ximo\ en\ regulador} = 1.25 V_{CO\ panel} N_{paneles\ en\ serie}, \quad (7.7)$$

donde  $V_{CO\ panel}$  es el voltaje en circuito abierto del panel solar seleccionado con valor de 20.8 V, mientras  $N_{paneles\ en\ serie}$  es el número de paneles en serie. Obteniendo un valor de 52 V de voltaje máximo. Se escoge el regulador MPPT 250/85, debido a que la corriente máxima es 85 A, De igual forma, el voltaje máximo 250 V. Así, se decide emplear sólo uno y se verifica la potencia que tolera, la cual es menor a la calculada previamente.



Figura 7.11 Regulador MPPT 250/85

### Elección de conductor

Para la elección del conductor se calcula la sección transversal que debe tener para no tener pérdidas mayores a 1%. Para lo cual, se emplea la expresión (7.8)

$$S_{conductor} = \frac{2 L I}{25 \Delta V}, \quad (7.8)$$

donde  $L$  es la longitud de tramo, la cual se considerará con un valor de 1.8 m,  $I$  se refiere a la corriente máxima por tramo, la cual fue hallada como 15.06 A en (7.6) ; y  $\Delta V$  es la caída

máxima permitida, la cual se escogió 2 %. Por lo cual se obtiene una sección de un valor de  $4.7 \text{ mm}^2$  y se escoge un conductor unifilar de sección  $6 \text{ mm}^2$ , Solar PV ZZ -F.



Figura 7.12 Conductor unifilar Solar PV ZZ-F  
Fuente: AutoSolar

#### *Conductor de baterías a sistema*

Para determinar el área de sección del conductor se calcula primero la corriente máxima que tendrá que soportar cuando se consuma la máxima demanda posible. Por lo cual, se emplea la expresión (7.09)

$$I_{max} = 1.25 \frac{P_{carga}}{V_T}, \quad (7.9)$$

donde  $P_{carga}$  es la máxima demanda posible, lo cual equivale la potencia máxima que el sistema puede pedir en determinado tiempo, y se obtiene de ANEXOS un valor de 489.4 W. Luego, la corriente máxima obtenida es 25.48 A; y para obtener la sección se vuelve a emplear la expresión (7.10)

$$S_{conductor} = \frac{2L I}{56 \Delta V} \quad (7.10)$$

con una máxima caída de 1%. Se obtiene una sección de  $9.48 \text{ mm}^2$ . Por lo cual, se escoge un conductor con sección de  $10 \text{ mm}^2$ , Solar PV ZZ -F.



Figura 7.13 Conductor  $10 \text{ mm}^2$ , Solar PV ZZ -F  
Fuente: AutoSolar

#### *Fusible de protección de paneles al regulador*

Para determinar la intensidad de corriente nominal del fusible se emplea la expresión (7.11), donde  $I_B$  es la corriente que recorre la línea,  $I_{adm}$  es la corriente admisible del conductor y  $I_n$  la corriente nominal del fusible. Así, queda la expresión (7.12), a partir de la cual se determina un fusible de 25 A ZJ Beny cilíndrico 10x38. Junto con su portafusible 10x38.

$$I_B \leq I_n \leq 0.9 I_{adm} \quad (7.11)$$

$$15 A \leq I_n \leq 0.9 (40) = 36 A \quad (7.12)$$



Figura 7.14 Fusible 25 A  
Fuente: AutoSolar

## 7.2. Subsistema de comunicación

### 7.2.1 Comunicación satelital

Para la comunicación satelital, se priorizará la detección del monitoreo de cetáceos, así el envío de los datos será enviado antes que la posición del vehículo. Se prosigue a describir el formato de los datos a enviar en el caso de detección, ver tabla 7.5. Lo cual implica una cantidad aproximada de 29 bytes. Por otro lado, para la comunicación de la posición y estado del vehículo se tiene el siguiente formato, ver tabla 7.6.

Tabla 7.1 Formato de datos para detección de cetáceos

id	Posición	Fecha	Especie id	Rango de frecuencias	intensidad
1 bit	8 bytes (altitud, longitud)	10 bytes	3 bits	8 bytes	2 bytes

Tabla 7.2 Formato de datos para posición y estado de vehículo

id	Posición	estado del vehículo
1 bit	8 Bytes	2 byte

Lo cual atribuye decir que el transceptor satelital debe tener una capacidad de envío de 30 bytes para poder satisfacer el aviso de detección de cetáceo en tiempo real. A partir de Anexos D.11, se escoge el modelo RockBlock M2, el cual posee un modem Iridium 9602 el cual provee de posibilidad de 50 bytes, el cual abastece las necesidades para el caso crucial de detección de cetáceos. Además, posee una antena incluida de Iridium, bajo consumo de energía y el precio más económico frente a las demás opciones.

### 7.2.2 Comunicación remota con interfaz

La comunicación remota se basará en una conexión de punto a punto entre cliente y punto de acceso. mediante routers y antenas para alargar la distancia. Así, la estructura de la comunicación será la observada en la Figura 7.13.

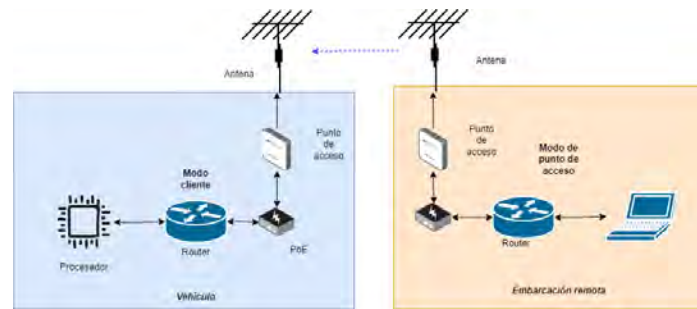


Figura 7.15 Diagrama de comunicación Wi-Fi

### *Selección del router*

Tal como se observó en el diagrama de comunicación Wi-Fi, se necesita un router para conectar los dos módulos principales del subsistema de monitoreo y navegación. Además de los sensores de percepción con interfaz ethernet (radar y cámara estereoscópica). Luego, debe existir un puerto para el módulo inalámbrico (punto de acceso). De Anexos D.12, se escoge el router RB750Gr3, debido a que los 5 puertos de este router son de data, lo cual es adecuado para proveer los puertos ethernet previamente mencionados en el subsistema de navegación y control.



Figura 7.16 Router RB750Gr3

### *Inyector Poe*

Para el punto de acceso, se necesita una entrada PoE, la cual contiene datos y energización, por ello se empleará un inyector PoE, para poder a una salida del ethernet agregar el voltaje necesario, ver Figura 7.17.



Figura 7.17 Inyector PoE

### *Módulo inalámbrico con antena*

Para lograr la comunicación WiFi de larga distancia, se emplea un punto de acceso con una antena omnidireccional, permitiendo conexión en cualquier dirección. Así, se aprecia las opciones comerciales en Anexos D.13. Se selecciona la opción de RadioLab, con un punto de acceso de baja potencia junto a la antena omnidireccional adecuada para el rango de operación a 8km. Además, de su corta longitud física de la antena. Mientras su montaje será según

recomendaciones del fabricante, pues consta de un acoplador en forma de tubo de acero inoxidable que se acopla a la tubería a unirse mediante abrazaderas en U. Por lo tanto, el tubo que soportará será de acero inoxidable 316 con una base que se atornilla al casco mediante tuercas remachables M10, ver Figura 7.18.

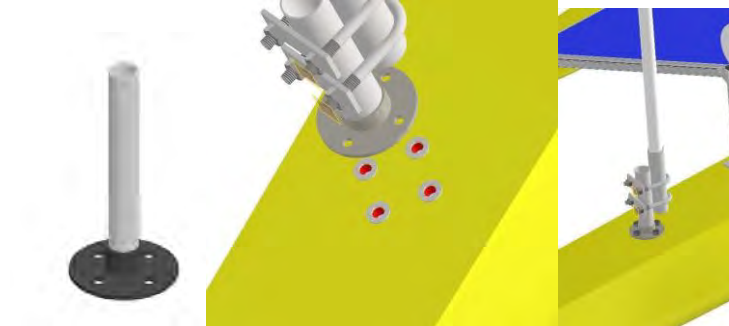


Figura 7.18 Acople de soporte de antena en casco principal



### 7.3 Arquitectura del hardware

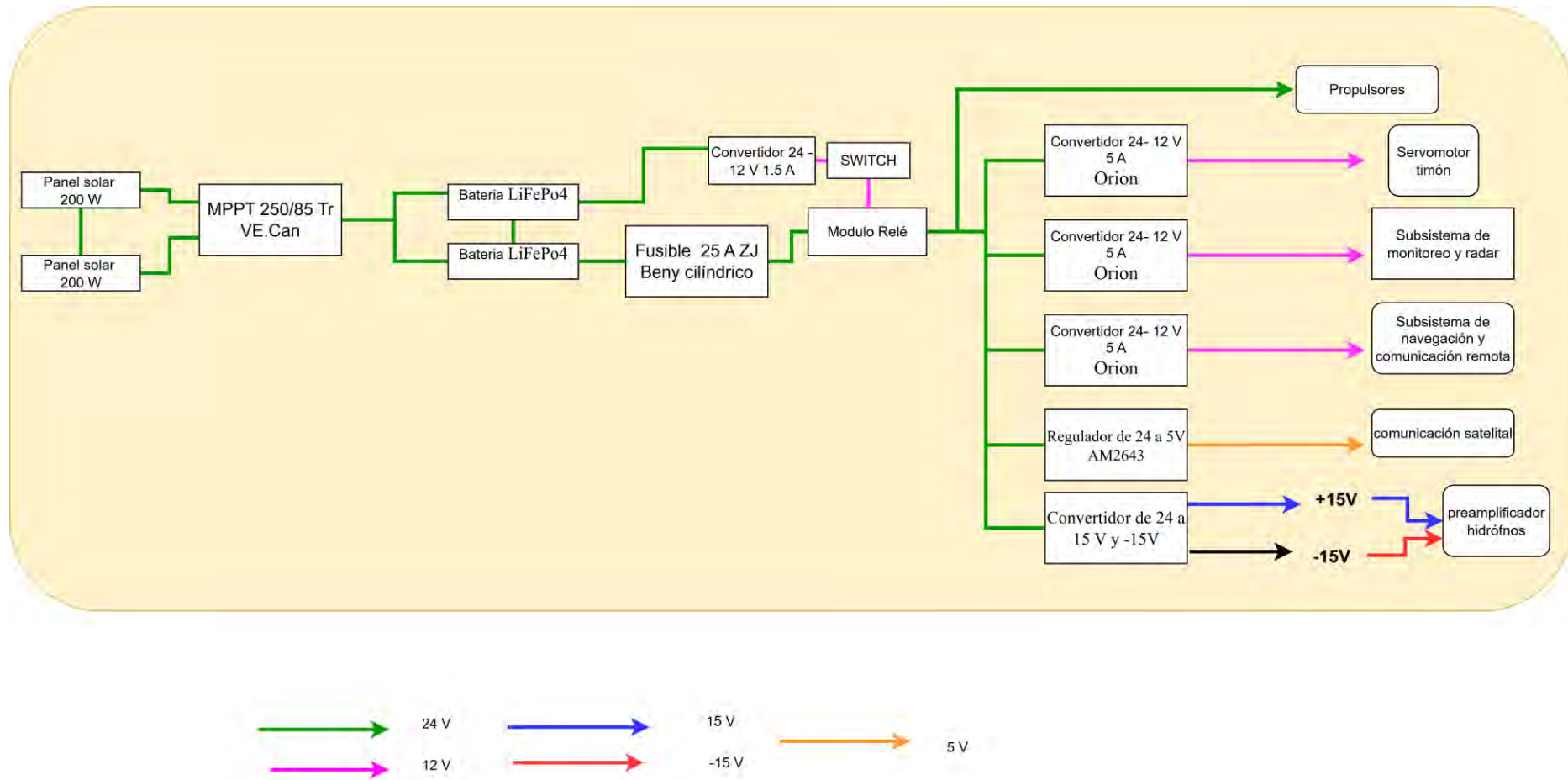


Figura 7.19 Arquitectura del sistema de energía

## 7.4 Interfaz

El vehículo contará con 2 interfaces, la primera consiste en el acceso a la información satelital que se obtiene cuando el vehículo navega de manera autónoma y va transmitiendo información del vehículo y las detecciones de cetáceos realizadas en su misión. Un croquis de la interfaz necesaria, se aprecia en la Figura 7.21. La cual consiste en una página web que accede a un servidor que almacena la información que satelitalmente se le almacena. Principalmente, consiste en informar la posición actual del vehículo por intervalos de tiempo, junto a un listado de datos numéricos como las coordenadas de posición, fecha y estado del vehículo. Mientras que se debe brindar información de la especie identificada, la posición donde se realizó y la fecha con hora de ello. Los cuales se pueden usar para fines de investigación y aviso de alerta para las actividades circundantes.

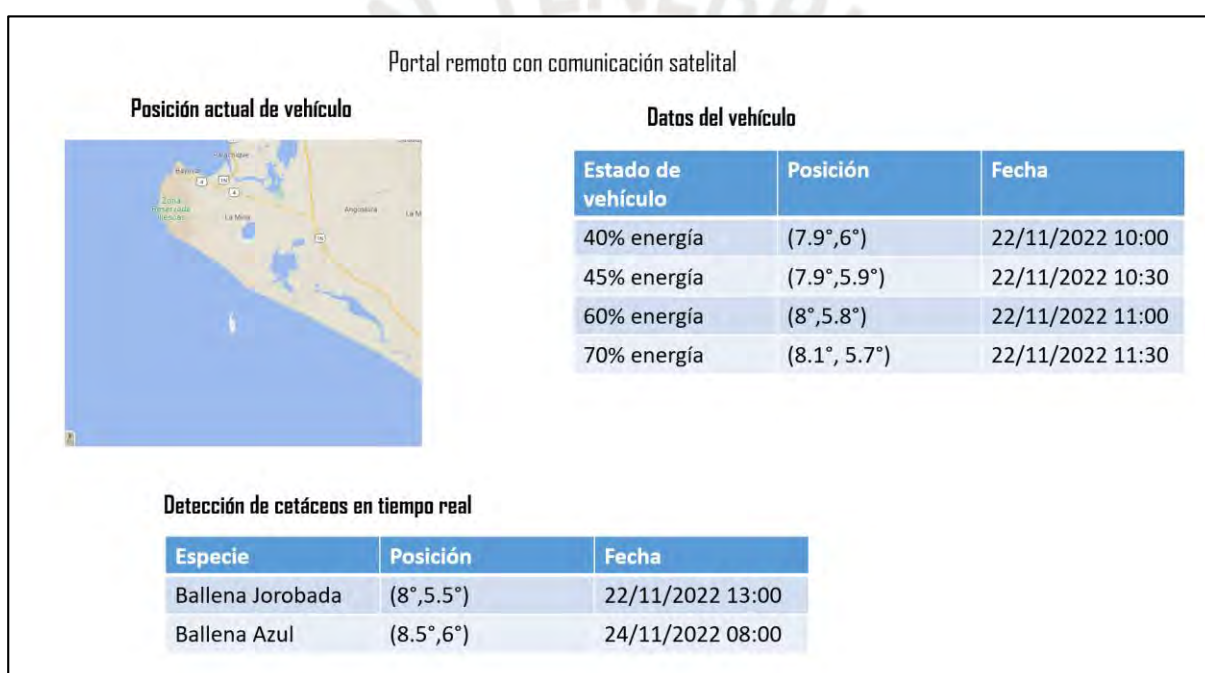


Figura 7.18 Croquis de interfaz para comunicación satelital

Luego, la otra interfaz es la que se obtendrá con la comunicación remota mediante Wi-Fi, la cual se emplea en caso de ser requerido el control remoto, lo cual sucede para el ingreso y salida del vehículo de superficie del entorno marítimo. El croquis de la interfaz se observa en la Figura 7.22. Donde debe existir dos botones de los cuales informe del inicio del modo remoto al vehículo, mientras el otro sea para el paro absoluto de los actuadores, similar a una parada de emergencia, pero no implica el apagado total, pues el subsistema de navegación debe mantenerse encendido para conocer la posición en todo momento. Luego, debe existir entradas de niveles para controlar la propulsión auxiliar y el ángulo de giro del timón.

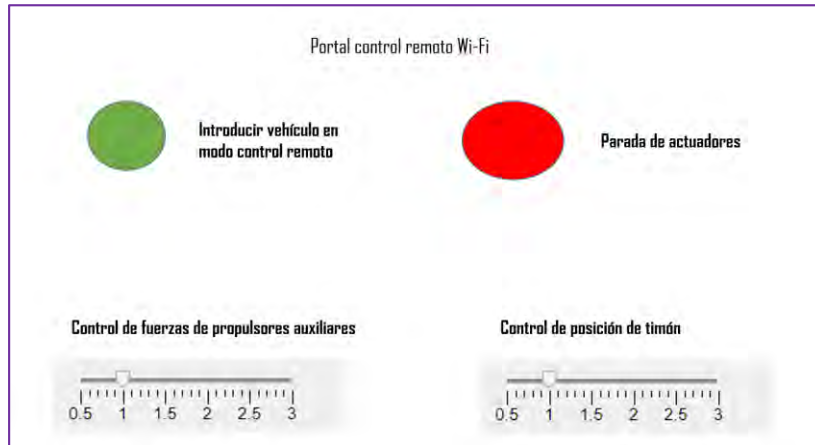


Figura 7.19 Croquis de interfaz para control remoto

Por último, se propone una tercera interfaz bajo la comunicación con Wi-Fí, el cual se pueda emplear en pruebas de navegación, o momentos en que se necesite verificar el funcionamiento del subsistema de navegación. En la Figura 7.23 se observa el croquis para esta modalidad de interfaz. En primer lugar, deben existir botones de inicio y ceso de transmisión de lectura. Luego, las lecturas de posición deben ser transmitidas, junto a los datos obtenidos sobre la detección de obstáculos dinámicos. Luego, es necesario observar las mediciones del sensor inercial que consistiría principalmente de la orientación y velocidad de giro. Finalmente, como el radar está conectado al router es posible, obtener las lecturas de este, junto a las detecciones del propio subsistema del vehículo. Todas las lecturas sirven para verificar el correcto funcionamiento del subsistema y logra asegurar el correcto cumplimiento de la misión del vehículo.

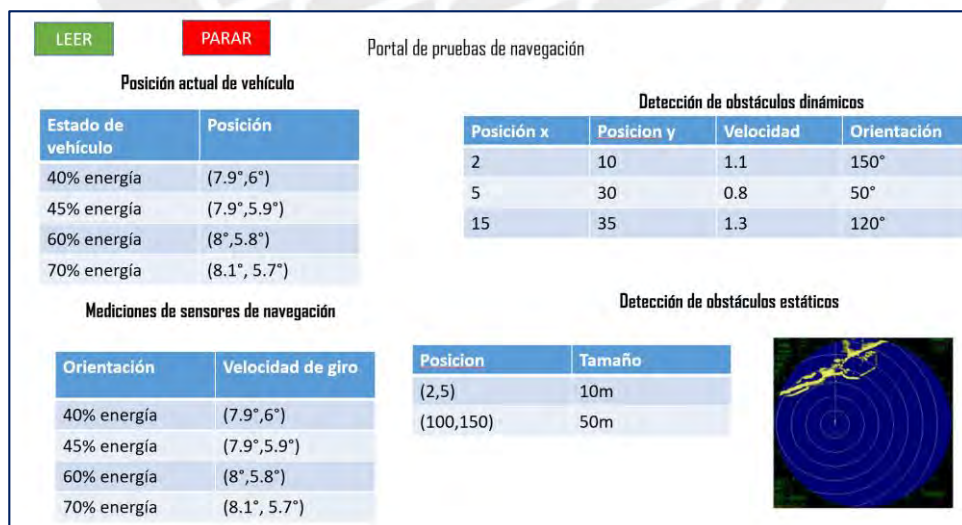


Figura 7.20 Croquis de interfaz para revisión de subsistema de navegación

## CAPÍTULO VIII: Integración de subsistemas

A continuación, se presentará el modelado integrado junto con arquitectura del hardware, listas de planos mecánicos y electrónicos. Los cuales contemplan a los componentes que se deben fabricar.

### 8.1 Modelado 3D del sistema integrado

En la Figura 8.1 se puede apreciar el modelo final del vehículo de superficie junto a la subunidad sumergida empleada para la propulsión, así mismo, se observa la integración del subsistema de energía y comunicación, subsistema de navegación autónoma, y subsistema de monitoreo de cetáceos. Luego, en la Figura 8.2 se puede apreciar la vista inferior del vehículo de superficie, el cual alberga los sensores del subsistema de monitoreo de variables oceanográficas y zooplancton.

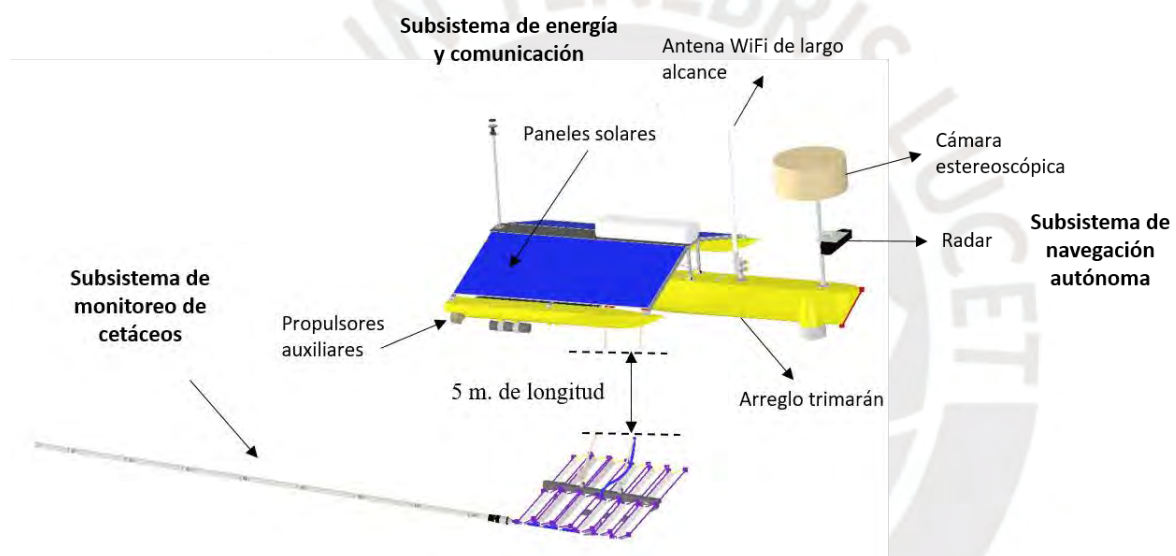


Figura 8.1 Modelado integrado del sistema

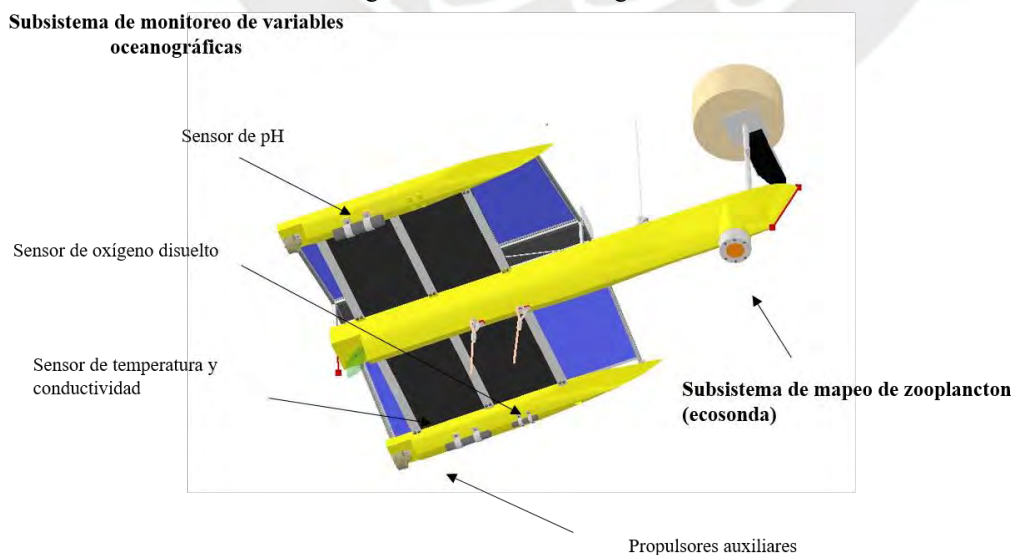


Figura 8.2 Vista inferior de sistema integrado

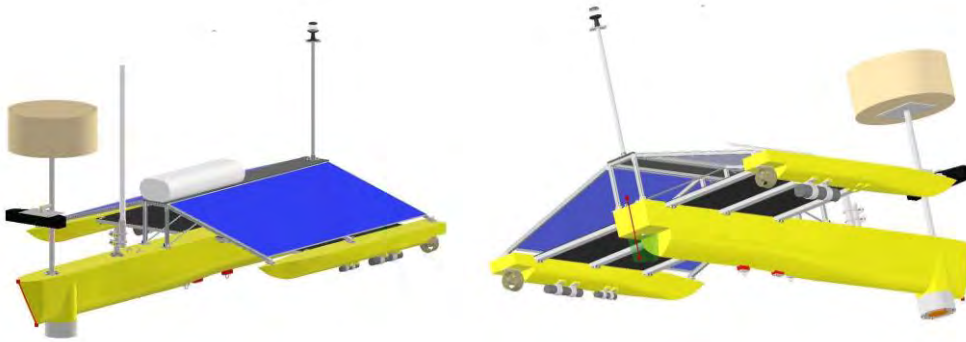


Figura 8.3 Vistas de vehículo de superficie

Por último, en la Figura 8.5, se presenta una vista de la integración de la subunidad sumergida con el arreglo de hidrófonos, los cuales se acoplan en el marco inferior de la subunidad unidad y el cable que transmite comunicación sube en conjunto con la cuerda hacia el vehículo de superficie, donde se encuentra los componentes para el procesamiento debido.

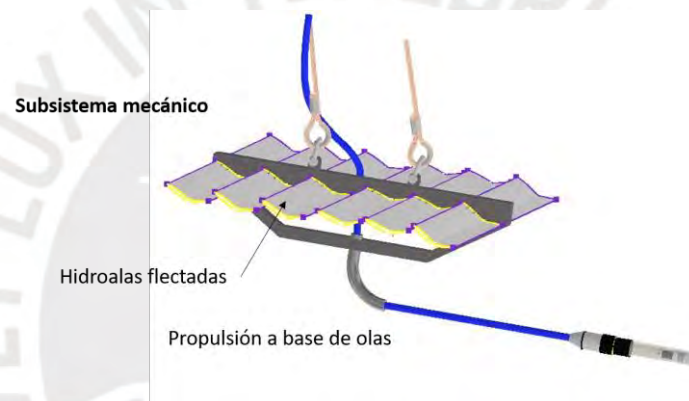


Figura 8.4 Vista de subunidad sumergida

## 8.2 Arquitectura del hardware integrado

A continuación, se presenta la arquitectura integrada de los subsistemas previamente explicados, en la Figura 8.5.

## 8.3 Diagramas de flujo del sistema integrado

Los diagramas de flujos para el vehículo no tripulado que integra todos los subsistemas se describen en la sección 3.5.4.



Despiece	Acople para propulsores	S. Mecánico
Despiece	Eje de hidroala	S. Mecánico
Despiece	Marco de subunidad	S. Mecánico
Despiece	Sujetador de resortes	S. Mecánico
Despiece	Placas para unión de cuerda con casco	S. Mecánico
Ensamble	Estructura de soporte de paneles	S. Mecánico
Ensamble	Estructura con paneles solares	S. Mecánico
Despiece	Soporte de extremos inferiores	S. Mecánico
Despiece	Soporte vertical inferior	S. Mecánico
Ensamble	Subensamble de subunidad sumergida	S. Mecánico
Despiece	Estructura de soporte de radar y cámara	S.Navegación
Despiece	Placa de radar	S.Navegación
Despiece	Placa de cámara	S.Navegación
Ensamble	Subensamble de soporte de radar y cámara	S.Navegación
Ensamble	Subensamble de soporte de luz de navegación	S.Navegación
Despiece	Conector de MHDO con tubo	S.Monitoreo
Despiece	Anillo de tensión	S. Monitoreo
Despiece	Soportes de cilindro piezoeléctrico	S. Monitoreo
Despiece	Soporte de pre-amplificador	S. Monitoreo
Despiece	Encapsulamiento de ecosonda	S.Monitoreo
Despiece	Anillo de ecosonda	S. Monitoreo
Despiece	Soporte de CT	S.Monitoreo
Despiece	Soporte pH	S. Monitoreo
Despiece	Soporte OD	S. Monitoreo
Ensamble	Soporte Antena	S.Comunicación
Ensamble	Ensamble de USV	Integración
Ensamble	Ensamble del sistema	Integración

### 8.5 Lista de planos electrónicos del sistema integrado

Al final del documento se presenta un plano electrónico del preamplificador del subsistema de monitoreo de cetáceos, y luego, planos de conexiones de cada subsistema, para finalizar un plano de conexión de todo el sistema integrado.

## CAPÍTULO IX: Costos

A continuación, se presentarán los costos de los componentes por subsistema, de los cuales se le incluye un 30% a los cuales deberán ser importados debido a los costos adicionales por aduanas. Además, las cotizaciones de los sensores del subsistema de monitoreo, se encuentran en Anexos.

### 9.1 Costos de subsistema mecánico

En este subsistema se dividió la fabricación de los cascos, con respecto de los demás componentes, pues estos se pueden realizar de manera particular debido a la geometría especial que poseen tras el diseño del Capítulo IV. Este proceso consiste en la formación de un molde de madera según la geometría requerida, y con empleo de masilla se rellena los filos o orificios que puede tener. Seguidamente se coloca una capa de resina Gelcoat. Por consiguiente, sigue una serie de capas de fibras de vidrio, primero se usa un MAT de 300gr, debido a que si se usa una gruesa podrían existir marcaciones en el caso. Luego, una de 450gr, 600gr, *woven roving* y por último, de 600gr. Cada una de las cuales, emplea resina, en este caso aproximadamente el consumo de resina del mat es el doble de la densidad mencionada. Finalmente, tras un lijado, se aplica la pintura anti incrustaciones, con lo cual se concluye el proceso. En la Tabla 9.1, se presentan los costos para la fabricación del casco principal. Mientras que en la Tabla 9.2 para los cascos laterales.

Tabla 9.1 Fabricación de casco principal

Subsistema	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)	Precio Unitario (S/.)	Precio Total (S/.)
Subsistema de mecánico	Molde de madera	1	50	50	191,5	191,5
	Masilla para madera	5	1	5	3,83	19,15
	Resina Gelcoat	2	29	58	111,07	222,14
	Fibra MAT 300gr	1	19,74	19,74	75,6042	75,6042
	Fibra MAT 450gr	1	21,05	21,05	80,6215	80,6215
	Fibra MAT 600 gr	2	24,63	49,26	94,3329	188,6658
	Fibra de vidrio WOVEN ROVING 830	1	4,37	4,37	16,7371	16,7371
	Pintura Fooling	1	71	71	271,93	271,93
	Resina en total	1	179	179	685,57	685,57
Total				132,74		508,3942

Tabla 9.2 Fabricación de cascos laterales

Subsistema	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)	Precio Unitario (S/.)	Precio Total (S/.)
Subsistema de mecánico	Molde de madera	1	50	50	191,5	191,5
	Masilla para madera	5	1	5	3,83	19,15
	Resina Gelcoat	1	29	29	111,07	111,07
	Fibra MAT 300gr	0,5	19,74	9,87	75,6042	37,8021
	Fibra MAT 450gr	0,5	21,05	10,525	80,6215	40,31075
	Fibra MAT 600 gr	1	24,63	24,63	94,3329	94,3329
	Fibra de vidrio WOVEN ROVING 830	0,5	4,37	2,185	16,7371	8,36855
	Pintura Fooling	1	71	71	271,93	271,93
	Resina en total	0,5	179	89,5	685,57	342,785
Total				93,87		359,5221

Luego, en la Tabla 9.3 se presenta el costo del resto de elementos del subsistema mecánico.

Tabla 9.3 Costos del subsistema mecánico

Subsistema	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)	Precio Unitario (S/.)	Precio Total (S/.)
Subsistema de comunicación	Placa oblong	6	16,9	101,4	64,727	388,362
	Tornillo M5 avellanado con oring	12	0,65	7,8	2,4895	29,874
	Tuercas remachables M5	8	0,3	2,4	1,149	9,192
	Tuercas remachables M5	8	0,5	4	1,915	15,32
	Soporte inferior de Timón	1	100	100	383	383
	Soporte superior de timón	1	100	100	383	383

Tornillo M10 inox	8	1	8	3,83	30,64
Paleta de timón	1	20	20	76,6	76,6
Mecha de timón	1	10	10	38,3	38,3
Mango (sleeve)	1	10	10	38,3	38,3
Bocinas	2	10	20	38,3	76,6
Servomotor i00600	1	316	316	1210,28	1210,28
Tornillos Monel 400 M10	24	1,3	31,2	4,979	119,496
Tubo aluminio 50x20	6	31,5	189	120,645	723,87
Plancha pvc	3	7	21	26,81	80,43
Hidroala pvc	12	10	120	38,3	459,6
resorte 1 in	12	4,888	58,656	18,72104	224,65248
Ejes de hidroala	36	3	108	11,49	413,64
Tornillos M3	96	0,1	9,6	0,383	36,768
Marco de subunidad	1	50	50	191,5	191,5
Grillete con pasador de tornillo	2	18	36	68,94	137,88
Estrobo de 5 m	2	10	20	38,3	76,6
Propulsores	2	274,3	548,6	1050,569	2101,138
Acople motores	2	10	20	38,3	76,6
Vigas estructuras 20x20x2	12	5	60	19,15	229,8
Total			315,6		7551,44248

## 9.2 Costos de subsistema de navegación y control

A continuación, se presenta en la Tabla 9.4 los costos del subsistema de navegación y control.

Tabla 9.4 Costos del subsistema de navegación y control

Subsistema	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)	Precio Unitario (S/.)	Precio Total (S/.)
Subsistema de navegación	Radar	1	2723,5	2723,5	10431,005	10431,005
	Cámara estereoscópica	1	344,5	344,5	1319,435	1319,435
	GPS compass	1	1300	1300	4979	4979
	IMU	1	1573	1573	6024,59	6024,59
	Luz de navegación	1	16,9	16,9	64,727	64,727
	Procesador	1	2600	2600	9958	9958
	Microcontrolador	1	18,2	18,2	69,706	69,706
	Soporte de sensores	1	30	30	114,9	114,9
	Base de soporte de luz de nav.	1	20	20	76,6	76,6
	Tubo de soporte de luz de nav.	1	20	20	76,6	76,6
Tornillo M10 inox.	8	1,3	10,4	4,979	39,832	
Total				8606,1		32961,363

### 9.3 Costos de subsistema de monitoreos

A continuación, se presenta en la Tabla 9.5 los costos del subsistema de monitoreo de cetáceos, en la Tabla 9.6 del mapeo de zooplancton y Tabla 97 del monitoreo de variables oceanográficas.

Tabla 9.5 Costos del subsistema de monitoreos de cetáceos

Subsistema	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)	Precio Unitario (S/.)	Precio Total (S/.)
Subsistema de monitoreo de cetáceos	Preamplificador	8	5,59	44,72	21,4097	171,2776
	Alambres de guía (1/2")	3	3,16	9,48	12,1028	36,3084
	epoxy	1	66	66	252,78	252,78
	hidrófono	16	19,5	312	74,685	1194,96
	ADC	1	3640	3640	13941,2	13941,2
	Tubo Tygon	16,5	13,39	220,935	51,2837	846,18105
	Aceite cas	4	63,7	254,8	243,971	975,884

	Cable umbilical	32,8	3,64	119,392	13,9412	457,27136
	Conector Teledyne MHDO	1	390	390	1493,7	1493,7
	Adaptador conector	1	66	66	252,78	252,78
	Tubo termoretractil	1,64	4	6,56	15,32	25,1248
	Soportes interiores de pvc	16	3,5	56	13,405	214,48
	Prensaestopa espiral	1	15	15	57,45	57,45
	Tapón tubería	1	4,8	4,8	18,384	18,384
Total				5205,687		19937,7121

Tabla 9.6 Costos del subsistema de monitoreo de zooplancton

Subsistema	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)	Precio Unitario (S/.)	Precio Total (S/.)
Subsistema de monitoreo de zooplancton	Ecosonda	1	57450	57450	218310	218310
	Filtro de ruido eléctrico	1	88	88	334,4	334,4
	Housing de bronce	1	100	100	380	380
	Tornillo M10 inox.	4	1,3	5,2	4,94	19,76
Total				57638		219024,4

Tabla 9.7 Costos del subsistema de monitoreos de variables oceanográficas

Subsistema	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)	Precio Unitario (S/.)	Precio Total (S/.)
Subsistema de monitoreo de variables oceanográficas	Conector through hull	3	28,6	85,8	109,538	328,614
	sensor CT	1	4940	4940	18920,2	18920,2
	soporte de CT	2	1,6	3,2	6,128	12,256
	sensor pH	1	6883,5	6883,5	26363,805	26363,805
	soporte de pH	2	1,8	3,6	6,894	13,788
	sensor DO	1	8450	8450	32363,5	32363,5
	soporte de DO	2	2	4	7,66	15,32
	Tornillo M6 inox.	12	1,3	15,6	4,979	59,748

	O-ring para soportes	12	1,287	15,444	4,92921	59,15052
Total				20370,1		78017,483

Tabla 9.8 Costos del subsistema de monitoreos en procesadores

Subsistema	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)	Precio Unitario (S/.)	Precio Total (S/.)
Subsistemas	Procesador	1	3000	3000	789,4736842	789,4736842
	Memoria 1 Tb	1	133	133	505,4	505,4
Total				3133		1294,873684

#### 9.4. Costos de subsistema de energía y comunicación

Por último, se presentan los costos del subsistema de energía en la Tabla 9.9 y comunicación en la Tabla 9.10.

Tabla 9.9 Costos del subsistema de energía y comunicación

Subsistema	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)	Precio Unitario (S/.)	Precio Total (S/.)
Subsistema de energía	Regulador 24 a 12 V	3	36,12	108,36	138,3396	415,0188
	Regulador de 24 a 5V	1	2	2	7,66	7,66
	Regulador 24 a 15V	2	5	10	19,15	38,3
	Relé	1	58	58	222,14	222,14
	Panel solar 200 W	2	215	430	823,45	1646,9
	canales	4	7,88	31,52	30,1804	120,7216
	policarbonato	1	30	30	114,9	114,9
	Baterías LiFePo4	2	1200	2400	4596	9192
	MPPT	1	845	845	3236,35	3236,35
	Cable conductor 6mm2	4	1,9	7,6	7,277	29,108
	Cable conductor 10mm2	5	4,21	21,05	16,1243	80,6215
Fusible	1	2	2	7,66	7,66	
Total				3069,88		11757,6404

Tabla 9.10 Costos del subsistema de comunicación

Subsistema	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)	Precio Unitario (S/.)	Precio Total (S/.)
Subsistema de comunicación	Rokblock	1	280	280	1072,4	1072,4
	Router	1	93	93	356,19	356,19
	Antena	1	270	270	1034,1	1034,1
	soporte	1	20	20	76,6	76,6
	Tornillo M10 inox.	4	1,3	5,2	4,979	19,916
Total				663		2539,29

### 9.5 Costos totales

Finalmente, se presentan los costos totales de todo el sistema integrado en la tabla 9.11, donde se verifica el costo menor a los comerciales existentes, pues estos llegan a los 150 000 dólares.

Tabla 9.11 Costos totales

Subsistema	Precio Total (\$)	Precio Total (S/.)
Subsistema mecánico	636,08	2417,104
Subsistema de navegación y control	8606,1	32703,18
Subsistema de monitoreos	86346,787	328117,7906
Subsistema de energía y control	315,6	1199,28
Total	95904,567	364437,3546

## Conclusiones

- Se diseñó el subsistema mecánico de un vehículo de superficie con configuración trimarán, con garantía de estabilidad conforme a los criterios establecidos por la Organización Marina Internacional (IMO), alcanzando un ángulo máximo de escora de  $50^\circ$ . La configuración geométrica y la distribución de los cascos fueron determinadas para optimizar la hidrodinámica del sistema, reduciendo significativamente la resistencia por fricción. Este diseño ofrece una estabilidad transversal superior en comparación con la opción comercial *Wave Glider*, basado en un monocasco con subunidad sumergida, el cual presenta limitaciones en el ángulo máximo de escora, mayor susceptibilidad a inestabilidades laterales y mayor resistencia al avance.
- Se diseñó un sistema de dirección compuesto por un timón con ángulos máximos de  $\pm 35^\circ$ , verificado conforme a criterios de maniobrabilidad náutica. Asimismo, se desarrolló un mecanismo de propulsión a partir de energía undimotriz, simulado bajo condiciones de olas con una altura de 1.1 m y periodo de 12 s, propias del entorno marino peruano objetivo. Además, el sistema incorpora estrategias para aumentar la absorción de energía con alas flectadas de  $22^\circ$  y resortes de extensión de 5000 kN/m en su mecanismo. A diferencia de las propuestas comerciales, que emplean hidroalas rectas bajo perfiles NACA.
- Se desarrolló la navegación global con una generación de ruta con el algoritmo A\* del mapa generado por PRM (*probabilistic road map*). Luego, para navegación local se simuló la evasión de obstáculos empleando el algoritmo de *Velocity obstacle*, rigiéndose bajo las reglas para evitar abordajes de COLREG. Este enfoque permite realizar navegaciones prolongadas en zonas de alto tránsito marino, superando las limitaciones de las soluciones comerciales, las cuales dependen de una serie de puntos de referencia y presentan una precisión de hasta 3 metros.
- Por otro lado, se diseñó un arreglo de hidrófonos con una ganancia sobre el ruido de 6.47 dB y un rango mínimo de atenuación de 5 metros. Asimismo, se implementó un sistema de detección de cetáceos basado en PCEN seguido de una red neuronal ResNet, alcanzando una precisión superior al 90% para ambas especies de ballenas. Se seleccionó además un ecosonda de 333 kHz para la detección eficaz de copópedas, la especie de zooplankton de mayor densidad en la zona norte del Perú, junto con sensores de temperatura, conductividad, pH y oxígeno disuelto elegidos por su adecuada precisión. Este desarrollo representa una mejora sustancial respecto a las configuraciones tradicionales, las cuales suelen emplear arreglos compactos de hidrófonos con menor ganancia, y realizan el reconocimiento a base de firmas acústicas, lo que conlleva una tasa de no detección superior al 27% y una alta incidencia de falsos positivos para ballenas jorobadas.
- Por último, se diseñó un sistema de energía capaz de acumular hasta 2500 W por día bajo la irradiación por día de 5.84 horas pico. Logrando abastecer de energía al sistema para su procesamiento y navegación diaria, lo cual supera opciones comerciales debido a que el arreglo trimaran dispone de mayor área para paneles solares. Luego, se seleccionó y estructuró la comunicación satelital y remota, junto a un croquis de interfaz necesario para el sistema.

## Recomendaciones

- Se recomienda optimizar el sistema de navegación autónoma con un enfoque de gestión energética que priorice la reducción del uso del timón y el empleo eficiente de los propulsores durante maniobras de evasión de obstáculos. Asimismo, se sugiere realizar pruebas de campo en el entorno marino de la zona norte del Perú, con el fin de validar la estabilidad del control de velocidad y orientación, sobre todo en caso de obstáculos dinámicos, y el trabajo en conjunto con la implementación del filtro kalman necesario para los controladores propuestos.
- Se sugiere profundizar en el procesamiento de sensores de entorno, como el radar y las cámaras estereoscópicas, con el objetivo de incorporar algoritmos que permitan la detección y obtención de variables cinemáticas de obstáculos estáticos y dinámicos. Asimismo, se recomienda implementar la integración de estos sistemas sensoriales con el algoritmo de navegación autónoma propuesto, a fin de testear la percepción del entorno y la toma de decisiones en tiempo real.
- Se recomienda examinar el posicionamiento del cable de comunicación del arreglo de hidrófonos en la subunidad sumergida durante su implementación en un entorno marino real. Actualmente, el cable atraviesa las hidroalas y se extiende hasta el vehículo de superficie, lo cual, en situaciones extremas, podría provocar interrupciones en la transmisión de datos y generar ineficiencias en el aprovechamiento energético del sistema de propulsión.
- Para el entrenamiento de la red ResNet destinada a la detección de cetáceos, se recomienda ampliar el conjunto de datos (dataset) incluyendo una mayor diversidad de vocalizaciones de ballenas, con el fin de abordar distintos tipos de firmas acústicas. Esta mejora incrementaría la robustez del modelo, especialmente en la detección de ballenas jorobadas, cuyas vocalizaciones presentan una amplia gama de cantos. Asimismo, se sugiere realizar grabaciones in situ en el entorno marino objetivo, con el propósito de evaluar la precisión del sistema en condiciones reales y validar su desempeño final.
- Se sugiere profundizar en el desarrollo de la comunicación satelital, considerando la posibilidad de transmitir un mayor volumen de datos relevantes, monitorear parámetros como el costo y la latencia, e integrar servicios en la nube para la recepción y procesamiento de información en tiempo real. En cuanto a la comunicación remota, se recomienda evaluar la viabilidad de transmitir datos provenientes de la cámara estereoscópica y de sensores de variables oceanográficas, con el fin de verificar su correcto funcionamiento durante las pruebas de campo y en visitas de monitoreo durante misiones en ejecución.
- Se recomienda realizar una verificación de la estabilidad y resistencia del arreglo de cascos en el entorno marino objetivo, llevando a cabo pruebas en diferentes momentos del día para evaluar su desempeño frente a variaciones climáticas y oceanográficas. Adicionalmente, con el fin de comprobar la robustez estructural ante condiciones de oleaje, se sugiere complementar estos ensayos con pruebas controladas en laboratorios especializados que cuenten con simuladores de olas.

## Bibliografía

- Aguilar, R., & Vega Valencia, D. (2016). Distribución de mamíferos marinos y su relación con el krill en el estrecho de Bransfield. *ANTAR XXI. Boletín Instituto Del Mar Del Perú*, 31(2), 223–228. <https://revistas.imarpe.gob.pe/index.php/boletin/article/view/67>
- Alcocer, A., Alonso, S., Al-tawil, A., Carella, A., Elkolali, M., Jenkins, A., Masset, O., Much, L., Sayols, M. & Schrader, R. (2020). A low-cost wave/solar powered unmanned surface vehicle. *Global Oceans 2020: Singapore - U.S. Gulf Coast*, 1-10. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF38699.2020.9389152>
- Alvarez, A., Barros, E., Campopiano, F., Lopes, G., Pellini, E., Silva, I., Silva, H. & Uenojo, A. (2018). Development of a Trimaran ASV. *IFAC PapersOnLine*, 51(29), 8-13. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.461>.
- Álvarez-Vara, R., Gallardo, C., Hinojosa, I., Luna, N., Luna-Jorquera, G., Thiel, M., Miranda-Urbina, D., Morales, N., Ory, N., Pacheco, A., Portflitt-Toro, M. & Zavalaga, C. (2018). Impacts of Marine Plastic Pollution From Continental Coasts to Subtropical Gyres—Fish, Seabirds, and Other Vertebrates in the SE Pacific. *Impacts of Marine Litter*. 5. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00238>.
- An, D., Li, D., Li, W., Jiao, Y., Wei, Q. & Wei, Y. (2019). Review of Dissolved Oxygen Detection Technology: From Laboratory Analysis to Online Intelligent Detection. *Sensors*, 19(18), 3995. <https://doi.org/10.3390/s19183995>.
- Aniceto, A., Biuw, M., Lindstrøm, U., Solbø, S., Broms, F., & Carroll, J. (2018). Monitoring marine mammals using unmanned aerial vehicles: quantifying detection certainty. *Ecosphere* 9(3). <https://doi.org/10.1002/ecs2.2122>.
- Aniceto, A., Biuw, M., Fielding, S., Gillespie, D., Harris, D., Jiménez, G., Johnston, P., Sinclair, R., Sivertsen, A., Solbø, S., Storvold, R., Verfuss, U. & Wyatt, R. A review of unmanned vehicles for the detection and monitoring of marine fauna. *Marine Pollution Bulletin*, 140, 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.01.009>.
- Aguilar, D., Aronés, K., Chang, F., Quipuzcoa, L. & Villanueva, P. (2005). Impacto de la variación oceanográfica estacional e interanual sobre los ensambles de microfitoplancton, mesozooplancton, ictioplancton y macrozoobentos de dos áreas costeras del norte del Perú entre 1994 y 2002. *Boletín Instituto Del Mar Del Perú*, 22(1-2), 66. Recuperado a partir de <https://revistas.imarpe.gob.pe/index.php/boletin/article/view/145>.
- Ball, K., Baumgartner, M., Bonnell, J., Corkeron, P., Hotchkin, C., Partan, J., Pelletier, L. & Van Parijs, S. (2021). Near real-time detection of low-frequency baleen whale calls from an autonomous surface vehicle: Implementation, evaluation, and remaining challenges. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 149(5), 2950-2962. <https://doi.org/10.1121/10.0004817>.
- Baumgartner, M., Bonnell, J., Bort, J., Corkeron, P., Hodges, B., Hotchkin, C., Mensi, B., Scott, B. & Van Parijs, S. (2020) Slocum Gliders Provide Accurate Near Real-Time Estimates of Baleen Whale Presence From Human-Reviewed Passive Acoustic Detection Information. *Frontiers in Marine Science*. 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00100>.
- Bello, J., Clark, C., Cramer, J., Farnsworth, A., Klinck, H., Knight, E., Lostanlen, V., Palmer, K. & Wong, T. (2019). Long-distance detection of bioacoustic events with per-channel energy normalization. *Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events 2019*. <https://doi.org/10.33682/ts6e-sn53>
- Bermant, P., Bronstein, M., Gero, S., Gruber, D. & Wood, R. (2019). Deep Machine Learning Techniques for the Detection and Classification of Sperm Whale Bioacoustics. *Scientific Reports*. 9, 12588-12598. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48909-4>.

- Camus, L., Andrade, H., Aniceto, A. S., Aune, M., Bandara, K., Basedow, S. L., Christensen, K. H., Cook, J., Daase, M., Dunlop, K., Falk-Petersen, S., Fietzek, P., Fonnes, G., Ghaffari, P., Gramvik, G., Graves, I., Hayes, D., Langeland, T., Lura, H., Dahle, S. (2021). Autonomous Surface and Underwater Vehicles as Effective Ecosystem Monitoring and Research Platforms in the Arctic—The Glider Project. *Sensors*, 21(20), 6752. <https://doi.org/10.3390/s21206752>
- Cartwright, M., Farnsworth, A., Kelling, S., LOSTANLEN, V., McFee, B. & Salamon, J. (2018). Per-Channel Energy Normalization: Why and How. *IEEE signal processing letters*, 26(1), 39-43, <https://doi.org/1109/LSP.2018.2878620>.
- Chapoñan, J. (2016). *Caracterización temporal del viento registrado en el borde costero de la ciudad de santa rosa y en las islas lobos de afuera, durante los años 2005 al 2012*. [Tesis para optar el título de: licenciado en física, Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo”]. <https://repositorio.imarpe.gob.pe/handle/20.500.12958/3131>
- Jiang, Q., Liao, Y., Li, Y., Miao, Y., Jiang, W., & Cheng, C. (2019). Unmanned surface vessel heading control of model-free adaptive method with variable integral separated and proportion control. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16, 1–12. <https://doi.org/10.1177/1729881419831584>
- Han, J., Cho, Y., Kim, J., Kim, J., Son, N., & Kim, S. Y. (2020). Autonomous collision detection and avoidance for ARAGON USV: Development and field tests. *Journal of Field Robotics*, 37(6), 987–1002. <https://doi.org/10.1002/rob.21935>
- Félix, Fernando (2016). Atlas sobre Distribución, Rutas Migratorias, Hábitats Críticos y Amenazas, para grandes ballenas en el Pacífico Oriental. <http://hdl.handle.net/1834/9355>
- De la torre, K. (2019). Perú: los derrames de petróleo crónicos e incalculables de la Costa Norte. *Mongabay Latam*. <https://es.mongabay.com/2019/11/peru-derrames-de-petroleo-en-el-mar/>
- Delory, E & Pearlman, J. (2019). Innovative Sensor Carriers for Cost-Effective Global Ocean Sampling. *Challenges and Innovations in Ocean In Situ Sensors*. 173-288. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809886-8.00005-3>
- Dominguez, N., Quispe, J. & Vasquez, L. (2011). Principales corrientes marinas frente a la costa peruana durante el 2008-2009. *Boletín Instituto del Mar del Perú*. 26(1-2),39-48. <https://hdl.handle.net/20.500.12958/2159>
- Zhou, C., Gu, S., Wen, Y., Du, Z., Xiao, C., Huang, L., & Zhu, M. (2020). The review unmanned surface vehicle path planning: Based on multi-modality constraint. *Ocean Engineering*, 200, Article 107043. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107043>
- Lysimachou, A. (2014, 1 de junio). La exploración de hidrocarburos en el mar. *Revista El Ecologista*, (81). *Ecologistas en Acción*. Recuperado de <https://www.ecologistasenaccion.org/28107/la-exploracion-de-hidrocarburos-en-el-mar/>
- Fanga, Y., Panga, M. & Wang, B. (2017). A course control system of unmanned surface vehicle (USV) using back-propagation neural network (BPNN) and artificial bee colony (ABC) algorithm. *Procedia Computer Science*. 111, 361-366. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.06.035>
- Félix, F., & Guzmán, H. M. (2014). Satellite tracking and sighting data analyses of Southeast Pacific humpback whales (*Megaptera novaeangliae*): Is the migratory route coastal or oceanic? *Aquatic Mammals*, 40(4), 329–340. <https://doi.org/10.1578/AM.40.4.2014.329>
- Flores, R., Espino, M., Luque, G., & Quispe, J. (2013). Patrones de variabilidad ambiental en el mar peruano. *Revista Peruana de Biología*, 20(1), 21–28. <https://doi.org/10.15381/rpb.v20i1.2630>
- Stateczny, A., Gierlowski, K., & Hoeft, M. (2022). Wireless Local Area Network Technologies as Communication Solutions for Unmanned Surface Vehicles. *Sensors*, 22(2), 655. <https://doi.org/10.3390/s22020655>

- Song, J., Hao, C., & Su, J. (2020). Path planning for unmanned surface vehicle based on predictive artificial potential field. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 17(2). <https://doi.org/10.1177/1729881420918461>
- Hine, R. G. (Inventor). (2016). Navigation of a fleet of autonomous vessels in current and wind (U.S. Patent No. 9,524,646 B2). United States Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US9524646B2/en>
- Ma, Y., Hu, M., & Yan, X. (2018). Multi-objective path planning for unmanned surface vehicle with currents effects. *ISA Transactions*, 75, 137–156. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.02.003>
- Antón, W., & Fiestas, W. (2010). *Delimitación y caracterización de bancos naturales de invertebrados bentónicos comerciales y áreas de pesca artesanal en el litoral de la región Piura (Punta Falsa – Cabo Verde)* (Informe IMARPE, 57 p.). Instituto del Mar del Perú.
- Instituto del Mar del Perú – IMARPE. (2012, mayo 1). *Mortandad de delfines en el litoral de la costa norte, febrero a abril del 2012* (Informe técnico, 81 p.). SINIA MINAM.
- De Lucio Burga, L., Solano Sare, A., Rebaza Castillo, V., Alfaro Mudarra, S., Tresierra Aguilar, Á., & Campos León, S. (2013). La pesca artesanal marina en la región La Libertad, Perú (Informe, Instituto del Mar del Perú). Instituto del Mar del Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12958/2222>
- International Hydrographic Organization. (2005). *Manual on Hydrography* (1.ª ed., Publ. M-13). International Hydrographic Bureau.
- Toro, C. (2012, 5 de abril). Tres mil delfines han muerto víctimas de la explotación petrolera. *La República*. <https://larepublica.pe/sociedad/622392-tres-mil-delfines-han-muerto-victimas-de-la-explotacion-petrolera/>
- Warren, J. D., Leach, T. H., & Williamson, C. E. (2016). Measuring the distribution, abundance, and biovolume of zooplankton in an oligotrophic freshwater lake with a 710 kHz scientific echosounder. *Limnology and Oceanography: Methods*, 14(4), 231–244. <https://doi.org/10.1002/lom3.10084>
- Vickers, W., Milner, B., Risch, D., & Lee, R. (2021). Robust North Atlantic right whale detection using deep learning models for denoising. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 149(6), 3797–3812. <https://doi.org/10.1121/10.0005128>
- Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., & Yuan, C. (2016). Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, 41, 71–93. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.04.018>
- Omrani, E., Mousazadeh, H., Omid, M., Tale Masouleh, M., Jafarbiglu, H., Salmani-Zakaria, Y., Makhsoos, A., Monhaseri, F., & Kiapei, A. (2019). Dynamic and static object detection and tracking in an autonomous surface vehicle. *Ships and Offshore Structures*, 15(7), 711–721. <https://doi.org/10.1080/17445302.2019.1668642>
- Han, J., Park, J., Kim, J., & Son, N. (2016). GPS-less coastal navigation using marine radar for USV operation. In *IFAC-PapersOnLine* (Vol. 49, No. 23, pp. 598–603). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.500>
- Mata Cruz, R. M. M. (2013). *Distribución espacio-temporal de la ballena azul (Balaenoptera musculus) por categorías de edad y sexo en el suroeste del Golfo de California* (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Recuperado de <http://repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/16748>
- Dirección de Hidrografía y Navegación. (2021). *Procedimiento de muestreo y análisis de agua y sedimentos* (Norma HIDRONAV-5139). Marina de Guerra del Perú.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2025, 4 de septiembre). *Satellite communications*. NWS Space Weather Prediction Center. Recuperado el 13 de Marzo del 2022, de <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/satellite-communications>

- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2022, enero 31). *Understanding Sound in the Ocean*. NOAA Fisheries. Recuperado el 31 de enero de 2022, de <https://www.fisheries.noaa.gov/insight/understanding-sound-ocean#does-sound-behave-differently-underwater-than-in-air>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2025, 20 de mayo). *Marine Mammal Unusual Mortality Events*. NOAA Fisheries. Recuperado el 30 de enero de 2022 de <https://www.fisheries.noaa.gov/national/marine-mammal-protection/marine-mammal-unusual-mortality-events>
- Pacheco Velásquez, A. S. (2019). *Modelamiento del hábitat de la ballena jorobada (Megaptera novaeangliae) en el norte de Perú: variabilidad espacio-temporal por tipo de grupo*. (Tesis de Licenciatura, Universidad Ricardo Palma). Repositorio Institucional URP. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/2429>
- Perupetro S.A. (2021). Informe mensual de actividades – mayo 2021. PeruPetro S.A. Recuperado de <https://www.perupetro.com.pe/wps/wcm/connect/corporativo/ba48bf3e-e1ea-4b54-afa8-0fcdd84eb3bb/2021-05+Informe+Mensual+de+Actividades+SL.pdf?MOD=AJPERES&2021-05%20Informe%20Mensual%20de%20Actividades%20SL>
- Reyes Vásquez, B. Y. (2014). *Cambios estacionales en la estructura de tallas y composición específica de la comunidad de mesozooplankton del norte y centro del Perú, mediante el análisis de imágenes digitales* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Piura. Recuperado de <https://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/267>
- Sæter, S. D. (2018). *COLREGS compliant collision avoidance system for a wave and solar powered USV* (Tesis de maestría, University of Science and Technology – Norwegian University of Science and Technology, Facultad de Ingeniería en Cibernética). Recuperado de <http://hdl.handle.net/11250/2562570>
- Perupetro S.A. (2009). *Estudio de impacto ambiental para el proyecto de adquisición sísmica 2D, 2DAD y 3D, y perforación exploratoria en el Lote Z-46. Línea base ambiental*. Capítulo III. Perupetro S.A.
- Soto, H. J. (2006). *Potencial contaminación por cromo en el proceso de refinación del petróleo* (Trabajo monográfico para optar al título profesional de Ingeniero Químico, Universidad Nacional de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química)
- Tretow, C. (2017). *Design of a free-rotating wing sail for an autonomous sailboat* (Tesis para título en ingeniería de vehículos, Instituto Real de Tecnología, Facultad de ciencias de ingeniería)
- Tiburcio, R. N. (2019). *Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) en el cuerpo marino receptor de la caleta Puerto Rico-Sechura- Piura 2019* (Tesis para optar al título profesional de ingeniero pesquero, Universidad Nacional del Perú, Facultad de ingeniería pesquera)
- Ministerio del Ambiente; Universidad Nacional Mayor de San Marcos. (2014). *Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: plancton, perifiton, bentos (macroinvertebrados) y necton (peces) en aguas continentales del Perú* [Manual]. Museo de Historia Natural, Departamentos de Limnología e Ictiología; Ministerio del Ambiente. <https://www.minam.gob.pe/diversidadbiologica/wp-content/uploads/sites/21/2014/02/M%C3%A9todos-de-Colecta-identificaci%C3%B3n-y-an%C3%A1lisis-de-comunidades-biol%C3%B3gicas.compressed.pdf>
- Institute for Marine and Antarctic Studies, University of Tasmania. (s. f.). Zooplankton sampling. IMAS. Recuperado 18 de Febrero del 2022, de <https://www.imas.utas.edu.au/zooplankton/about/zooplankton-sampling>
- Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (SERNAPESCA). (2010). Ballena azul o rorcual gigante [PDF]. SERNAPESCA. Recuperado de

- [https://www.sernapesca.cl/files/importacion/rescateyconservacion/fichasespecies\\_conservacion/grandes\\_cetaceos/ballena\\_azul.pdf](https://www.sernapesca.cl/files/importacion/rescateyconservacion/fichasespecies_conservacion/grandes_cetaceos/ballena_azul.pdf)
- Veirs, S., Veirs, V., & Wood, J. D. (2016). Ship noise extends to frequencies used for echolocation by endangered killer whales. *PeerJ*, 4, e1657. <https://doi.org/10.7717/peerj.1657>
- WALSH PERÚ S.A. (2011). *Estudio de impacto ambiental para la perforación exploratoria lote Z-35: Resumen ejecutivo*. WALSH PERÚ S.A.
- Weilgart, L. S. (2008). *The impact of ocean noise pollution on marine biodiversity* (Informe, International Ocean Noise Coalition). Recuperado de [https://awionline.org/sites/default/files/uploads/documents/Weilgart\\_Biodiversity\\_2008-1238105851-10133.pdf](https://awionline.org/sites/default/files/uploads/documents/Weilgart_Biodiversity_2008-1238105851-10133.pdf)
- Shi, Y., Liu, L., Zhao, J., Long, Y., Chen, J., & Cui, Y. (2016). Mechanical system design of a Trimaran USV. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 31(5), 36–48. <https://doi.org/10.21311/002.31.5.05>
- Wang, H., Du, X., & Zhang, B. (2019, junio). Propulsive Performance Analysis of Underwater Flapping Multi-foil. *OCEANS 2019 – Marseille* (pp.1-5). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2019.8867579>
- Gao, Y., Xie, L., & Lam, T. L. (2022). A novel and more efficient oscillating foil for wave-driven unmanned surface vehicles. *Frontiers in Robotics and AI*, 9. <https://doi.org/10.3389/frobt.2022.759200>
- DNV GL SE. (enero 2015). *Rules for classification and construction – Part I: Ship technology*, Edition January 2015 (Rules I – Ship Technology). Hamburgo, Alemania: DNV GL SE. Recuperado de <https://armcol.org/wp-content/uploads/2024/08/3246.-GL-Rules-for-Classification-and-Construction.pdf>
- Grafton, T. J. (2007). The roll motion of trimaran ships (Tesis doctoral, University College London, University of London). UCL Discovery. <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1445979>
- Zhang, J. (1997) Design and hydrodynamic performance of trimaran displacement ship (Tesis doctoral, University of London)
- Sun, X., Ma, S., Sang, H., Li, C., & Liu, J. (2022). Research on the propulsion performance of spring-hydrofoil mechanism of the wave glider. *Ocean Engineering*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112709>
- Sun, X., Sun, C., Sang, H., & Li, C. (2022). Dynamics modeling and hydrodynamic coefficients identification of the wave glider. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(4), 520. <https://doi.org/10.3390/jmse10040520>