

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**DISEÑO DE PLATAFORMA DE ACOUPLE Y MINIROV PARA
VEHICULOS MARINOS DE SUPERFICIE**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico, que presenta el bachiller:

Jorge Luis Isaac Ramírez Chávez

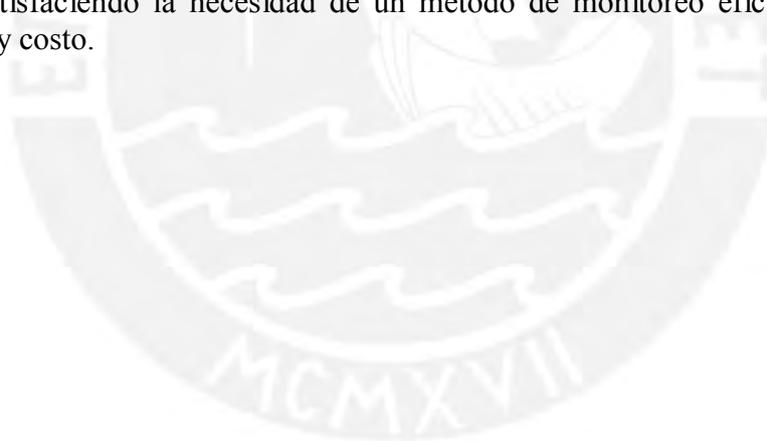
ASESOR: MSc. Francisco Fabián Cuellar Córdova

Lima, diciembre del 2017

RESUMEN

La contaminación del agua es un problema que afecta a millones de personas y se agrava cada vez más debido a que no se aplican métodos de monitoreo de la calidad del agua que sean eficientes debido al costo y tiempo que implican. El deterioro de la calidad del agua ha sido ocasionado principalmente por el vertimiento de aguas residuales domésticas y efluentes residuales producto de la realización de actividades económicas además de la inadecuada eliminación de residuos sólidos.

Por ello, en el presente trabajo se plantea el diseño de un sistema que consta en un miniROV (Remote Operated Vehicle) y una plataforma que flota sobre la superficie del agua. Ambos elementos se complementan para realizar el trabajo de inspección y monitoreo de la calidad del agua de forma remota. La plataforma se acopla a vehículos marinos para su desplazamiento sobre el agua, sobre la misma se ubica un cabrestante que la conecta al miniROV mediante un cable umbilical además del banco de baterías que energiza al sistema y el receptor Wifi que hace posible la comunicación inalámbrica. El miniROV es operado de manera remota por un operario que se encarga de su movimiento bajo el agua, el proceso de inspección se realiza mediante la transmisión de video en tiempo real mientras que el monitoreo consiste en la medición de ciertos parámetros químicos del agua. Cabe resaltar que el miniROV posee un sistema de comunicación acústico para conocer su posición debajo del agua con mayor precisión. El sistema elaborado es capaz de inspeccionar y monitorear la calidad del agua satisfaciendo la necesidad de un método de monitoreo eficiente en cuanto a tiempo y costo.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR
EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO

Titulo : Diseño de plataforma de acople y miniROV para vehículos marinos de superficie.
Asesor : MSc. Francisco Fabián Cuellar Córdova
Alumno : Jorge Luis Isaac Ramírez Chávez
Código : 20122081
Tema N° : # 208
Fecha : 05/09/17

Perú
Lima
10 de Septiembre de 2017
Francisco Fabián Cuellar Córdova

Descripción y Objetivos

La contaminación del agua es un problema que afecta a millones de personas y se agrava cada vez más debido a que no se aplican métodos de monitoreo de la calidad del agua que sean eficientes debido al costo y tiempo que implican. El deterioro de la calidad del agua ha sido ocasionado principalmente por el vertimiento de aguas residuales domésticas y efluentes residuales producto de la realización de actividades económicas además de la inadecuada eliminación de residuos sólidos.

Por ello, en el presente trabajo se plantea el diseño de un sistema que consta en un miniROV (Remote Operated Vehicle) y una plataforma que flota sobre la superficie del agua. Ambos elementos se complementan para realizar el trabajo de inspección y monitoreo de la calidad del agua de forma remota. La plataforma se acopla a vehículos marinos para su desplazamiento sobre el agua, sobre la misma se ubica un cabrestante que la conecta al miniROV mediante un cable umbilical además del banco de baterías que energiza al sistema y el receptor Wi-Fi que hace posible la comunicación inalámbrica. El miniROV es operado de manera remota por un operario que se encarga de su movimiento bajo el agua; el proceso de inspección se realiza mediante la transmisión de video en tiempo real mientras que el monitoreo consiste en la medición de ciertos parámetros químicos del agua. Cabe resaltar que el miniROV posee un sistema de comunicación acústico para conocer su posición debajo del agua con mayor precisión. El sistema elaborado es capaz de inspeccionar y monitorear la calidad del agua satisfaciendo la necesidad de un método de monitoreo eficiente en cuanto a tiempo y costo.



INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE TABLAS.....	ii
INDICE DE FIGURAS.....	iii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 MARCO DE REFERENCIA.....	4
1.1 MARCO HISTÓRICO.....	4
1.2 MARCO TEÓRICO.....	8
1.3 MARCO METODOLÓGICO.....	13
CAPÍTULO 2 DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO.....	15
2.1 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.....	15
2.2 ESTRUCTURA DE FUNCIONES.....	16
2.3 PRESENTACIÓN DEL DISEÑO.....	18
2.4 SISTEMA MECÁNICO.....	21
2.4.1 Recipiente para proteger el sistema electrónico.....	24
2.4.2 Marco del miniROV.....	26
2.4.3 Subsistema de flotabilidad del miniROV.....	28
2.4.4 Subsistema de propulsión del miniROV.....	29
2.4.5 Estabilidad del miniROV.....	33
2.4.6 Diseño de los cascos de la plataforma.....	36
2.5 SISTEMA ELECTRÓNICO.....	38
2.5.1 Módulo de sensores.....	39
2.5.2 Subsistema de posicionamiento acústico.....	43
2.5.3 Subsistema de iluminación.....	45
2.5.4 Computadora embebida.....	46
2.5.5 Subsistema de comunicación.....	47
2.5.6 Energización del sistema.....	50
2.5.7 Diagrama Esquemático.....	53
2.6 DIAGRAMAS DE FLUJO DEL SISTEMA.....	54
2.7 SIMULACIONES.....	59
CAPÍTULO 3 PLANOS Y COSTOS.....	62
3.1 Relación de planos.....	63
3.2 Costo del sistema mecánico.....	63
3.3 Costo del sistema electrónico.....	64
3.4 Costo total.....	65
CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	66
4.1 Conclusiones.....	66
4.2 Recomendaciones.....	67
REFERENCIAS.....	69

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1: Características de miniROVs comerciales.....	5
Tabla 1. 2: Características de ROV usados en investigaciones científicas.....	7
Tabla 1. 3: LARS empleados por compañías para servicios oceanográficos	7
Tabla 2. 1: Materiales usados en la fabricación de ROVs.....	21
Tabla 2. 2: Componentes electrónicos que van dentro del recipiente submarino	25
Tabla 2. 3: Características generales de propulsores para ROVs.....	32
Tabla 2. 4: Peso de componentes de la plataforma	38
Tabla 2. 5: Comparación de principales características de sensores inerciales	40
Tabla 2. 6: Características de las cámaras comparadas.....	42
Tabla 2. 7: Características de sondas multiparamétricas	42
Tabla 2. 8: Características principales del sonar Micron	44
Tabla 2. 9: Características principales de linternas.....	45
Tabla 2. 10: Características principales de sistemas embebidos.....	47
Tabla 2. 11: Características de los receptores inalámbricos	48
Tabla 2. 12: Consumo de corriente del sistema	50
Tabla3. 1: Lista de planos del sistema.....	63
Tabla3. 2: Costo de fabricación de componentes mecánicos.....	63
Tabla3. 3: Costo de adquisición de componentes mecánicos.....	64
Tabla3. 4: Costo de componentes electrónicos.....	64
Tabla3. 5: Costo total del sistema	65

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: (a)Dibujos de sistemas para el lanzamiento y recuperación de un ROV. ... 6	6
Figura 1. 2: Sistemas de posicionamiento acústicos. (a) Sistema USBL. (b) Sistema SBL. (c) Sistema LBL. 8	8
Figura 1. 3: Clasificación de los vehículos submarinos. 9	9
Figura 1. 4: Marco de un ROV de exploración hecho con tubos de PVC. 10	10
Figura 1. 5: Propulsor fijo para ROV 11	11
Figura 1. 6: Batería DC usada para alimentar un ROV 11	11
Figura 1. 7: MiniROV de exploración Seaotter 2.0 12	12
Figura 2. 1: Estructura de funciones del sistema Fuente: Elaboración propia 17	17
Figura 2. 2: Diseño del sistema mecatrónico Fuente: Elaboración propia. 18	18
Figura 2. 3: Diseño del miniROV 19	19
Figura 2. 4: Diseño de la plataforma 20	20
Figura 2. 5: Dimensiones del miniROV 22	22
Figura 2. 6: Subsistemas del miniROV 23	23
Figura 2. 7: Componentes de la plataforma 23	23
Figura 2. 8: Dimensiones de la plataforma. 24	24
Figura 2. 9: Distribución de componentes dentro de contenedor electrónico. 25	25
Figura 2. 10: Depósito para el sistema electrónico 26	26
Figura 2. 11: Marco del miniROV 26	26
Figura 2. 12: Soportes para la sonda multiparamétrica Trimeter 27	27
Figura 2. 13: Soportes para el recipiente de componentes electrónicos 27	27
Figura 2. 14: Soporte lateral Fuente: Elaboración propia 28	28
Figura 2. 15: Soportes horizontales superior, medio e inferior de la estructura del miniROV 28	28
Figura 2. 16: Arrastre producido por el miniROV y el cable umbilical 30	30
Figura 2. 17: Gráficos de rendimiento del propulsor T100. 32	32
Figura 2. 18: Propulsor T100 33	33
Figura 2. 19: Estabilidad del vehículo en base a sus dimensiones. 33	33
Figura 2. 20: Estabilidad del vehículo en base a la posición de los propulsores 34	34
Figura 2. 21: a) Configuración estable de un cuerpo submarino. b) Inestabilidad de un cuerpo submarino causada por desalineamiento entre los centros de masa y flotabilidad. 34	34
Figura 2. 22: Momento de enderezado del miniROV. 36	36
Figura 2. 23: Parámetros relevantes para el diseño de cascos. 37	37
Figura 2. 24: Esquema de conexión entre los componentes del sistema 39	39
Figura 2. 25: Sensor Inercial ADIS16334. 41	41
Figura 2. 26: Raspberry Pi camera V.2 42	42
Figura 2. 27: Sonda multiparamétrica Trimeter 43	43
Figura 2. 28: Sonar Micron 44	44
Figura 2. 29: Linterna LED Lumen Subsea Light 46	46
Figura 2. 30: Ubicación de las linternas LED en el miniROV 46	46
Figura 2. 31: Raspberry Pi 3 47	47
Figura 2. 32: Fathom-X Board 47	47
Figura 2. 33: Receptor CPE510 49	49
Figura 2. 34: Diagrama de comunicación 49	49
Figura 2. 35: Diagrama de distribución de energía 52	52
Figura 2. 36: Diagrama esquemático del sistema 53	53
Figura 2. 37: Diagrama de flujo principal del sistema 54	54
Figura 2. 38: Diagrama de flujo de Configuración Inicial 55	55

Figura 2. 39: Diagrama de flujo de la recepción de comandos de navegación.....	56
Figura 2. 40: Desplazamiento miniROV Fuente: Elaboración propia	57
Figura 2. 41: Enrollar/Desenrollar cable umbilical.....	57
Figura 2. 42: Diagrama de flujo de lectura de sensores	58
Figura 2. 43: Diagrama de flujo del envío de información	58
Figura 2. 44: Modelo simplificado del miniROV para simulación.....	59
Figura 2.45: Volumen de control	60
Figura 2.46: Distribución de la presión sobre el miniROV.	60



INTRODUCCIÓN

Existe un gran interés en el desarrollo de nuevas tecnologías para la realización de estudios oceanográficos tanto para el ámbito comercial como para el científico. La información obtenida de estos estudios permite conocer las características físicas, químicas y biológicas de los mares y océanos que termina siendo fundamental para actividades como la pesca, la exploración submarina, el monitoreo de la calidad de agua u operaciones de construcción submarina. Debido a esto, cada vez es más común el uso de robots acuáticos autónomos y telecontrolados para lograr obtener datos en mayor cantidad y con mayor precisión. De esa forma se podría contar con mejores herramientas que sirvan para la inspección y control de los recursos hídricos.

Como se sabe, la contaminación del agua es un problema que se agrava cada vez más afectando a millones de personas. Según un estudio realizado por la Organización Mundial de la Salud, cada 90 segundos muere un niño debido a alguna enfermedad relacionada con el agua [1]. En los últimos años la calidad ambiental de los diferentes cuerpos de agua en el Perú como: lagos, lagunas y ríos ha ido disminuyendo debido al rápido crecimiento poblacional y las malas prácticas por parte de las empresas. En un estudio realizado por la ANA (Autoridad Nacional del Agua) en los años 2010-2012 se identificaron las fuentes contaminantes por vertiente. Se concluyó que este deterioro ambiental fue causado principalmente por el vertimiento de aguas residuales domésticas y efluentes residuales producto de la realización de actividades económicas además de la inadecuada eliminación de residuos sólidos [2]. Otra de las causas de este problema es la baja frecuencia de monitoreo de los recursos hídricos como lagos y lagunas, según la ANA desde el último Inventario Nacional de Lagunas

y Represamiento han pasado 30 años [3]. Realizar el monitoreo de forma tradicional implica un gran costo debido a los aspectos que deben ser tomados en cuenta: el traslado y viáticos del equipo de trabajo, el envío de muestras y el alquiler de equipo de monitoreo [4]. Debido a esta situación suceden casos como el de la laguna de Paca en Jauja que fue reportada como contaminada con residuos fecales y aceite quemado desde el 2011 [5] y recién en el 2016 se comenzaron los trabajos de recuperación [6]. Mientras que un estudio realizado por investigadores peruanos y norteamericanos en el 2014 reveló que la concentración de arsénico en el agua estaba por encima de lo permitido por la Organización Mundial de la Salud en algunos distritos del Perú. Este informe fue publicado en el boletín de la OMS [7]. Al contaminar el agua, el número de virus y bacterias crece de forma desmesurada poniendo en riesgo la salud de las personas y causando enfermedades como el cólera, la disentería o infecciones al estómago y a los intestinos.

Este tipo de problemas pueden ser prevenidos si es que se realizara un continuo monitoreo de las aguas, aunque como ya ha sido mencionado anteriormente, los métodos tradicionales son costosos y poco precisos debido a que el número de muestras por tomar es muy limitado. Por lo que, aprovechando el desarrollo tecnológico en el que se encuentra el campo de la oceanografía se pueden emplear vehículos como los ROV (Vehículos Operados Remotamente) submarinos en vez de los métodos tradicionales de monitoreo. Estos vehículos son capaces de realizar observaciones detalladas y meticulosas debajo del agua además de poder ser implementados con una variedad de equipos para monitoreo de aguas como cámaras y sondas multiparamétricas. Usando este tipo de vehículos se logra un impacto mínimo sobre el medio donde se realiza el estudio debido a sus dimensiones y que el muestreo se hace de forma rápida y sencilla a diferencia de los métodos tradicionales donde se llega a hacer uso de buques oceanográficos. Si bien es cierto que un ROV submarino depende de una embarcación para su desplazamiento hacia el lugar donde se realizará el estudio, usando otro tipo de vehículos como los ASV (Vehículos Autónomos Superficiales) se puede minimizar aún más el impacto ambiental sobre la zona de estudio. Los ASV se desplazan sobre la superficie del agua sin necesidad de tripulación además de ser seguros, rápidos y fáciles de maniobrar de forma remota [7]. Otro beneficio será la disminución de costos al necesitar un menor número de

personas para realizar la labor del monitoreo además de aumentar el número de puntos donde se realizará el estudio.

El presente trabajo tiene por finalidad proponer el diseño de un sistema mecatrónico capaz de monitorear e inspeccionar lo que sucede debajo del agua en los diferentes recursos hídricos como mares, lagos y lagunas. Este sistema consistirá en una plataforma que flota sobre el agua que será la encargada de lanzar y remolcar a un MiniROV, esta plataforma será diseñada de tal forma que pueda acoplarse a vehículos marinos para su desplazamiento. El MiniROV contará con una cámara que permitirá realizar un análisis cualitativo de lo que sucede debajo del agua, además de contar con un sistema de comunicación que permita conocer su ubicación en todo momento. Las dimensiones y el peso del ROV serán lo mínimo posible para evitar el hundimiento de la plataforma. Al elaborar este sistema no solo se busca una solución para supervisar la calidad del agua en diferentes lugares y conocer los recursos que este pueda ofrecer sino también se trata de minimizar la intervención humana y de esa forma las personas ya no estarán expuestas a ningún tipo de riesgo.

CAPÍTULO I

MARCO DE REFERENCIA

1.1 Marco Histórico

Un ROV submarino es un robot operado remotamente que trabaja debajo del agua, este robot se conecta con la superficie a través de un cable umbilical que consiste en un conjunto de cables que alimentan al ROV y sus componentes que pueden ser cámaras o sensores [8]. Por medio de este cable umbilical es por donde se envían las señales provenientes de los diferentes sensores acoplados al robot y también por donde se envían las señales de control que permiten desplazar al ROV debajo del agua.

Actualmente, existen una gran cantidad de ROVs comerciales y otros que son usados para investigaciones científicas. Los ROVs se pueden clasificar según su tamaño y funcionalidad, para esta tesis el tipo de ROV a usar será el MiniROV debido a que se realizará un trabajo solo de monitoreo y no será necesario alguna tarea de intervención.

A nivel comercial, las compañías que venden MiniROVs destacan su gran portabilidad debido al poco peso que los caracterizan y el buen desempeño que tienen aún en terreno hostil. Además de ofrecer diversos programas para hacer más simple el control del ROV. En la Tabla 1.1 se muestra un resumen de algunos modelos de MiniROV ofrecidos por diferentes compañías y sus principales características.

En cuanto al ámbito de patentes podemos ver que existe interés por el tema de automatizar la forma en que el ROV submarino es lanzado y remolcado. En [9] se plantea el uso de un barco para aviones no tripulados acondicionado de tal forma que permita el sumergir y sacar del agua a un ROV. Además de incluir espacios para almacenar estos robots. Mientras en [10] se usa un barco de servicio operado remotamente mediante radioteleetría el cual contiene generadores, un cabrestante umbilical para subir y bajar el ROV al agua y un sistema de control de lastrado. Por último, en [11] se describe un sistema para el lanzamiento y recuperación de ROVs que consiste en un trabajo en conjunto de un LARS (Launch And Recovery System) y un TMS (Tether Management System). Este último sirve como un sistema de control del cable umbilical por el cual se conecta al ROV. Si en caso el ROV sufre algún desperfecto, se emplea el miniROV hasta que se obtenga un reemplazo. En la Figura 1.1 se muestran gráficos de los sistemas anteriormente mencionados.

Tabla 1. 1: Características de miniROVs comerciales
Fuente: Elaboración propia

Modelo					
Dimensiones	32.5 x 25.8 x 27.9 cm	49.5 x 38 x 63 cm	30.6 x 23 x 21 cm	29.8 x 40.6 x 68.6 cm	49 x 27 x 21 cm
Peso	8.5 kg	26 kg	3.6 kg	23.5 kg	6.4 kg
Profundidad de trabajo	Hasta 100-150 m	Hasta 300 m	Hasta 76 m	Hasta 300 m	Hasta 150 m
Temperatura de operación	De -5°C a 40°C	De -5°C a 40°C	No especifica	No especifica	No especifica
Voltaje de operación	19.2 VDC	16 VDC	100-240 VAC	100-130 VAC o 200-250 VAC	220 VAC
Velocidad	2.5 nudos	3 nudos	1.9 nudos	4 nudos	3 nudos
Empresa	Deep Trekker	Deep Trekker	VideoRay	Teledyne Benthos	Subsea Tech
Duración de batería	6-8 horas	3-6 horas	No usa batería	No usa batería	4 horas
Longitud de cable	50-75-100-150 m	150-300 m	40 m	No especifica	Hasta 250 m
Cámaras	1 cámara a color	1 cámara a color	1 cámara	2 cámaras (1 a color, 1 a blanco y negro)	2 cámaras a color

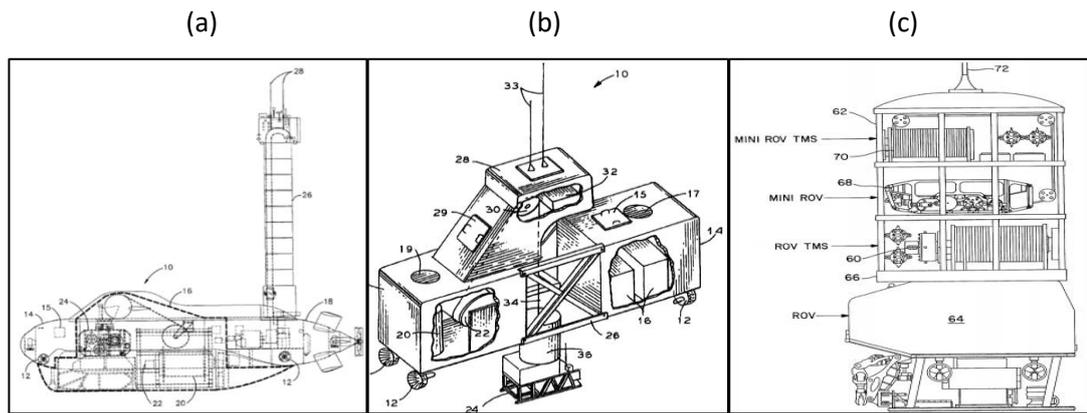


Figura 1. 1: (a) Dibujo de sistemas para el lanzamiento y recuperación de un ROV. Barco acondicionado para el sumergir y recoger ROVs. (b) Vehículo de servicio operado remotamente. (c) Sistema para lanzar y recuperar un ROV y miniROV.
 Fuente: Elaboración propia

Por el lado de investigaciones científicas se han enfocado en el diseño de ROVs de distintas formas como el de tipo torpedo [12] o esférico [13], también se han desarrollado ROV para distintos campos como la industria petrolera [14], la industria pesquera [15], operaciones científicas [16], la biología [17], arqueología submarina [18], etc. Al usar un MiniROV se debe poner énfasis en cómo aprovechar las imágenes obtenidas por la cámara ya que este tipo de vehículos se usan generalmente en tareas de observación. En [19] se propone usar un sistema automatizado que detecta animales usando algoritmos de selección y clasificadores Bayesianos en la información obtenida por video. Por otro lado, en [20] se presenta un método por el que se obtiene una reconstrucción en 3D usando imágenes obtenidas por una sola cámara debajo del agua. En [21] se trata de estimar la población de krill en los mares del Antártico analizando videos obtenidos por ROVs. Para lograr esta complicada labor se convirtió el video en una cadena de imágenes de forma que se analizaron las imágenes a una velocidad de 3 imágenes por segundo. En la Tabla 1.2 se presentan algunos ROVs usados en proyectos de investigación

Para lanzar y remolcar ROVs para monitoreo e inspección de aguas profundas generalmente se usan sistemas llamados LARS (Launch And Recovery Systems). Este tipo de sistema consiste en un cabrestante que sea capaz de permitir al ROV trabajar a su máxima capacidad, este cabrestante funciona con un motor hidráulico que permite enrollar y desenrollar el cable umbilical conectado al ROV. También se usa un mecanismo de agarre para levantar al ROV y llevarlo al agua antes de su descenso. Debido a la gran cantidad de energía necesaria para el funcionamiento del

LARS es necesario implementar un HPU (Hydraulic Power Unit) que se encargue de proveer energía. En la tabla 1.3 se muestran algunos LARS usados por compañías para realizar servicios oceanográficos.

Tabla 1. 2: Características de ROV usados en investigaciones científicas.
Fuente: Elaboración propia

Modelo	 Romeo	 Tessie	 Pemex ROV	 Hyper-Dolphin
Dimensiones	130 x 90 x 96 cm	71 x 30 x 41 cm	140 x 120 x 90 cm	300 x 200 x 260 cm
Peso	500 kg	30 kg	350 kg	4200 kg
Profundidad de trabajo	500 m	150 m	2000 m máximo	3000 m
Voltaje de operación	No especifica	24 VDC	440 VAC	No especifica
Velocidad	0.6 m/s	No especifica	1.25 m/s	1.54 m/s
Longitud de cable	600 m	91.44 m	1800 m	No especifica
Cámaras	2 cámaras	1 cámara	3 cámaras	3 cámaras

Tabla 1. 3: LARS empleados por compañías para servicios oceanográficos
Fuente: Elaboración propia

Modelo	 Saab Seaeye LARS	 E-LARS	 XWM-90 LARS	 Hydramec LARS
Longitud	5.1 m	5.2 m	6.0 m	6.5 m
Ancho	2.6 m	No especifica	4.0 m	2.75 m
Peso máximo de carga	17 ton	20 ton	15 ton	22 ton
Alcance máximo	4.4 m	6.0 m	5.0 m	No especifica
Velocidad de recuperación	0.5 m/s	1 m/s	No especifica	No especifica
Longitud de cable	1 100 m	4 000 m	No especifica	1650 m
Compañía	Saab Seaeye	Kongsberg	Subsea Innovation	Hydramec

1.2 Marco Teórico

Dado que esta tesis se centra en el diseño de una plataforma y un miniROV que permita inspeccionar lo que sucede debajo del agua será necesario plantear algunos conceptos que sirvan de apoyo para una lectura interpretativa de todo el documento.

Sistema de posicionamiento acústico:

Para empezar, un aspecto esencial que permitirá el correcto funcionamiento de todo el sistema mecatrónica es el sistema de posicionamiento por el cual el vehículo marino obtendrá información de la posición en la que se encuentra el ROV en todo momento. En el campo de la oceanografía generalmente se usan sistemas de posicionamiento acústicos: USBL (Ultra Short Base Line) [22], SBL (Short Base Line) [23] [24] [25] y LBL (Long Base Line) [26] [27] [28]. En la figura 1.2.1 se muestran los sistemas de posicionamiento acústico comúnmente usados.

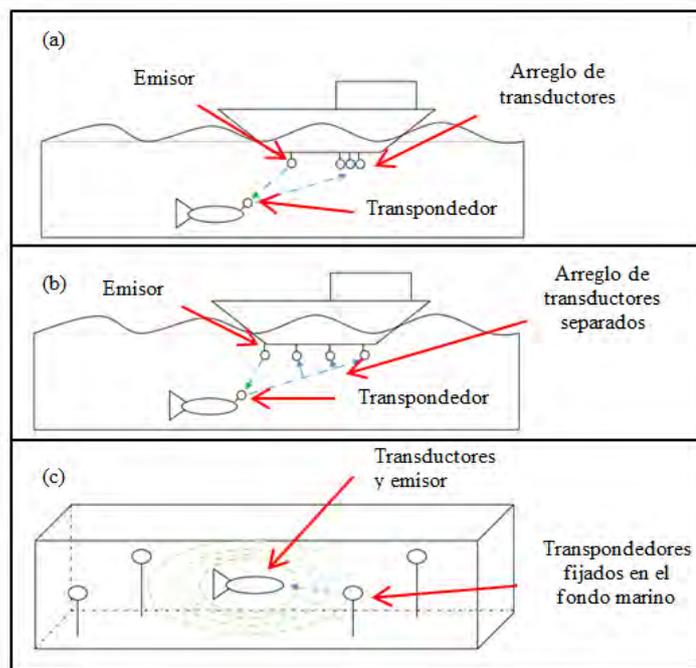


Figura 1. 2: Sistemas de posicionamiento acústicos. (a) Sistema USBL. (b) Sistema SBL. (c) Sistema LBL.

Fuente: Elaboración propia

El sistema USBL generalmente es el que se usa en vehículos pequeños. Esta técnica consiste en un emisor y un arreglo de transductores ubicados en la parte inferior de un vehículo superficial marino y un transpondedor montado encima del equipo

subacuático. El emisor emite un pulso acústico al transpondedor, el cual responde con otro pulso acústico. Una vez que el arreglo de transductores recibe este pulso se calcula la distancia relativa mediante el tiempo que le tomó al pulso en regresar y la velocidad promedio del sonido debajo del agua. También se calcula el ángulo relativo analizando el arreglo de transductores.

En el caso del sistema SBL el arreglo de transductores se acomoda de forma diferente ya que existe una separación entre transductores de 10 a 50 metros. El funcionamiento de este sistema es similar al USBL. Por último, el sistema LBL se diferencia de los anteriores porque usa más de un transpondedor y estos se encuentran fijos en el fondo marino separados a una distancia que puede variar desde 100 m hasta varios kilómetros. Al usar transpondedores fijos, el área de estudio está limitada.

Vehículos submarinos:

Los vehículos submarinos son aquellos que están hechos para sumergirse y navegar debajo del agua. Se clasifican en tripulados y no tripulados, donde estos últimos son controlados de manera remota y sus dimensiones son muy pequeñas comparados con los vehículos tripulados. A su vez, los vehículos no tripulados se clasifican en AUVs (Autonomous Underwater Vehicles) los cuales son autónomos y ROVs (Remote Operated Vehicles) que son operados remotamente. La principal diferencia entre estos vehículos submarinos es que cuando un AUV completa una tarea debe volver a un punto previamente programado para analizar la información recolectada mientras que un ROV puede transmitir dicha información en tiempo real por medio de un cable umbilical.

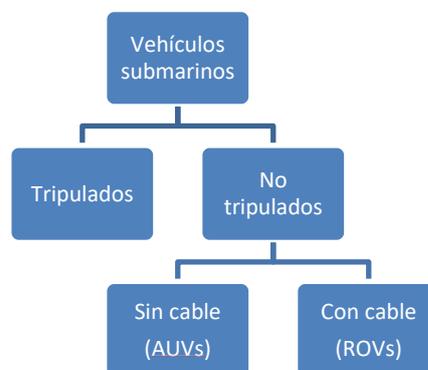


Figura 1. 3: Clasificación de los vehículos submarinos.

Fuente: Elaboración propia

Componentes de un ROV:

Aunque algunos fabricantes de ROVs desarrollan nuevas técnicas e implementan nuevos componentes en estos robots con el objetivo de cumplir nuevas y más complejas tareas, los componentes que conforman un ROV pueden dividirse de la siguiente manera:

a) Marco: se encarga de proveer una estructura firme donde puedan ser montados o sujetados los demás componentes del ROV. También puede ser acondicionado para llevar otros instrumentos o herramientas como manipuladores, sensores o equipo de muestreo, etc. El material y configuración del marco depende del tipo de ROV que se desea diseñar y las condiciones a las cuales va a trabajar. En la Figura 1.4 se presenta el marco de un ROV casero hecho con tubos de PVC.



Figura 1. 4: Marco de un ROV de exploración hecho con tubos de PVC.
Fuente: Askix

b) Sistema de flotación: Generalmente el peso de los componentes usados para conformar al vehículo submarino es mayor al del agua por lo que tienden a hundirse. Para contrarrestar esta flotabilidad negativa se emplea un sistema de flotación utilizando componentes más ligeros que el agua como espuma de poliuretano o sintética. El objetivo de este sistema es que el sumergible tenga una flotabilidad neutra o levemente positiva de forma que, si ocurre algún desperfecto con los propulsores en medio de una misión, el ROV flotará hacia la superficie en vez de hundirse.

c) Sistema de propulsión: para impulsar al vehículo submarino debajo del agua se usan un conjunto de propulsores configurados dependiendo de los grados de libertad

requeridos. Comúnmente se usan configuraciones de 3 propulsores y 5 propulsores, en el caso del primero se instalan 2 propulsores en sentido horizontal y 1 en vertical mientras que en el segundo caso se montan 4 propulsores de forma horizontal y 1 en vertical. Dependiendo de su posición respecto al centro de gravedad del vehículo, se afecta la maniobrabilidad y la controlabilidad. En la Figura 1.5 se muestra un propulsor usado para vehículos submarinos y superficiales desarrollado por la empresa VideoRay.



Figura 1. 5: Propulsor fijo para ROV
Fuente: VideoRay

d) Fuente de energía: Para energizar a un ROV existen dos tipos de configuraciones, el suministro de energía puede ubicarse en la superficie o pueden montarse baterías DC (Figura 1.6) en el ROV aislándolos del agua. El tipo de fuente de energía a elegir dependerá del tipo de trabajo que el ROV va a realizar. Se debe tener en cuenta que, si se elige ubicar la fuente de energía en la superficie, existirá una pérdida de voltaje importante que dependerá de la longitud del cable umbilical por donde transitará la energía eléctrica hacia el vehículo submarino.



Figura 1. 6: Batería DC usada para alimentar un ROV
Fuente: Hobby Model

e) Luces, sensores y cámaras: dependiendo del tipo de trabajo que se quiera realizar se acoplan diversos dispositivos como cámaras y luces cuando se trata de trabajos que requieren inspección visual o sensores si es que se quiere realizar un monitoreo de la calidad del agua en diversos puntos. Se debe procurar que estos dispositivos se encuentren aislados del agua si en caso no sean a prueba de esta. También se debe tener en cuenta que, a mayor número de estos instrumentos, la corriente consumida aumentará. El miniROV de observación Seaotter 2.0 (Figura 1.7) cuenta con una cámara frontal y dos luces LED para realizar su trabajo de inspección.



Figura 1. 7: MiniROV de exploración Seaotter 2.0
Fuente: JW Fishers

Parámetros de la calidad del agua:

En la presente tesis se plantea el monitoreo de la calidad del agua, es por eso que es necesario saber cuáles son los parámetros que se pueden medir para definir la calidad del agua. Los parámetros medibles se pueden dividir en tres grupos:

a) Parámetros físicos: Este tipo de parámetros comprende características como el sabor, olor y color del agua que pueden ser analizados de forma cualitativa mediante la mera observación por lo que los resultados son un poco subjetivos. Aunque existen ciertos parámetros que pueden ser medidos con sensores como la conductividad y resistividad

b) Parámetros químicos: Los parámetros químicos son los más fáciles y rápidos de analizar, existen un gran número de sensores capaces de medir diferentes parámetros de este tipo. Para medir la mayor cantidad de estos parámetros se usan sondas multiparamétricas que cuentan con espacio para acoplar e intercambiar varios sensores. Algunos de los parámetros que generalmente se miden son: alcalinidad, acidez, sólidos disueltos, temperatura, turbidez.

c) Parámetros biológicos: la cantidad de microorganismos en las aguas está relacionada con las características física y químicas. Entre estos parámetros se pueden distinguir la clorofila, bacterias coliformes y estreptococos además de hongos, mohos y levaduras. Para medir estos parámetros primero se toma una muestra de agua y posteriormente se analiza en un laboratorio.

1.3 Marco Metodológico

El procedimiento en el cual se basará esta tesis será la metodología alemana VDI 2221 “Enfoque sistemático para el desarrollo y diseño de sistemas y productos técnicos” [29]. El objetivo del VDI 2221 es proponer una metodología para el diseño de sistemas de forma que se trabaje de una manera más eficiente. Como primer paso se tiene que definir la tarea que se quiere lograr, luego se determinan cuáles son las funciones que debe cumplir nuestro sistema para lograr su objetivo y se organizan de forma que se obtiene una **Estructura de Funciones**. Más adelante se buscan soluciones que permitan lograr cumplir todas las funciones que se han encontrado en el paso anterior. Se usan herramientas como la **Matriz Morfológica** y métodos como la división del sistema en dominios: mecánico, electrónico y de control. Posteriormente se elige la solución óptima basándose en evaluaciones económicas y técnicas (Anexo A).

En el capítulo 2 se presentará el diseño del sistema a partir del concepto de solución óptimo obtenido. Conforme se va avanzando con el diseño se podrían cambiar algunas configuraciones con el fin de optimizar aún más el resultado. Se detallarán la estructura del miniROV y los componentes electrónicos involucrados en su diseño. También se explicarán las características mecánicas y electrónicas de la plataforma y los dispositivos que permiten su interacción con el miniROV. En el capítulo 3 se

realizarán simulaciones y experimentos, los resultados obtenidos de estos procedimientos serán interpretados y documentados para evaluar el funcionamiento del sistema diseñado. Finalmente, en el capítulo 4 se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo



CAPÍTULO 2

DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO

2.1 Requerimientos del sistema

Requerimientos mecánicos:

- El sistema (plataforma y miniROV) debe asegurar que los componentes electrónicos queden aislados del agua en todo momento por lo que contará con protección IP67 de la norma CEI60529 Degrees of Protection.
- La masa del sistema completo debe ser de 25 kg aproximadamente de forma que sea fácil de manipular y transportar.
- El miniROV debe contar con 6 grados de libertad que le permitan realizar movimientos de avance/retroceso, descenso/ascenso, izquierda/derecha, pitch, yaw y roll.
- La velocidad máxima del miniROV al avanzar debe ser de 1.5 m/s.
- La profundidad de trabajo máxima del miniROV será de 10 m.
- La plataforma debe acoplarse a vehículos marinos de superficie de mediana y pequeña envergadura de forma manual.
- Las dimensiones de la plataforma deben ser como máximo 1.2 m de largo, 1 m de ancho y 0.5 m de altura.

Requerimientos electrónicos:

- El sistema será alimentado con 48VDC y 20 A de corriente como máximo.

- El sistema debe contar con un sistema de comunicación que permita controlar los movimientos del miniROV desde una estación base a una distancia de 200 m.
- El sistema debe estimar la posición del miniROV debajo del agua usando un sistema de posicionamiento hasta una distancia máxima de 75 m.
- El tiempo de autonomía de las baterías debe permitir al sistema funcionar por al menos 2 horas.
- El miniROV debe poder realizar el monitoreo aún en bajas condiciones de luz. El sistema de iluminación debe ser de al menos 700 lúmenes.
- El sistema debe ser capaz de medir los siguientes parámetros: profundidad, pH, temperatura y conductividad del agua.

Requerimientos de control:

- Las funciones del sistema serán controladas por una computadora que enviará instrucciones de manera inalámbrica a la plataforma.
- La comunicación entre la plataforma y el miniROV será mediante un cable umbilical que conecta a ambos de al menos 25 m de largo.
- La variable a controlar para el desplazamiento del miniROV será la velocidad de cada actuador del mismo.
- El sistema contará con una interfaz que le permitirá visualizar el video en tiempo real y los datos obtenidos de los sensores con una frecuencia de actualización de 10 Hz.

2.2 Estructura de funciones

En la Figura 2.1 se muestra la estructura de funciones del sistema a diseñar, lo primero que se debe hacer es acoplar manualmente la plataforma al vehículo marino de superficie y energizar el sistema (componentes electrónicos del miniROV y la plataforma). Luego se espera a que se establezca la comunicación inalámbrica entre la plataforma y la computadora desde la cual se controla todo el sistema y se verifica la correcta comunicación entre la plataforma y el miniROV por medio del cable umbilical. El vehículo marino de superficie se encarga de desplazar el sistema (plataforma y miniROV) hasta el área a analizar. Luego el miniROV desciende y comenzar a recolectar datos mediante la medición de parámetros del agua, la

transmisión de video en tiempo real y la información obtenida del sistema de posicionamiento. Es importante mencionar que el descenso del miniROV solo depende de sus propulsores y el operador puede activar el sistema de iluminación para transmitir video en lugares con poca luz. La información recolectada será mostrada en una interfaz gráfica. En todo momento se sabrá la posición del ROV y el rumbo que sigue, de esa forma se evitan colisiones con objetos o seres vivientes parte del ecosistema debajo del agua. Para el ascenso del miniROV se usará un actuador ubicado en la plataforma que enrollará el cable umbilical. Finalmente se corta la comunicación inalámbrica y se desenergiza todo el sistema.

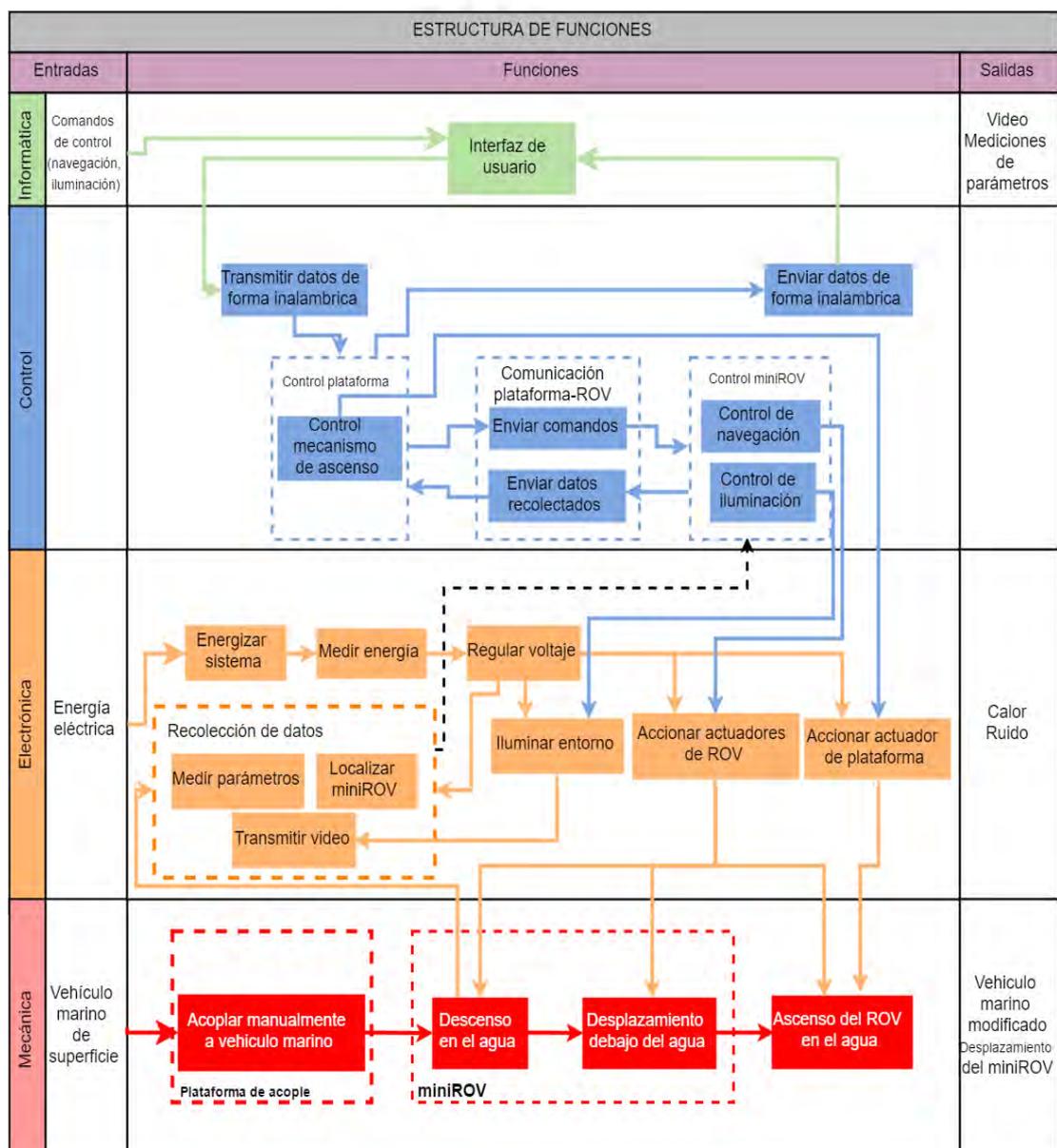


Figura 2. 1: Estructura de funciones del sistema

Fuente: Elaboración propia

2.3 Presentación del diseño

En la Figura 2.2 se presenta el concepto de solución óptimo obtenido mediante un análisis técnico-económico descrito en el anexo A. Se compararon distintas propuestas de conceptos de solución siguiendo la norma VDI 2221. A continuación, se presenta una descripción general del diseño que tendrá el sistema y posteriormente se detalla el sistema electrónico, describiendo los componentes empleados y sus conexiones a los dispositivos de control del sistema. También se detalla el sistema mecánico del miniROV y la plataforma. Finalmente, se muestra el diagrama de flujo que permita cumplir las funciones detalladas en la estructura de funciones.

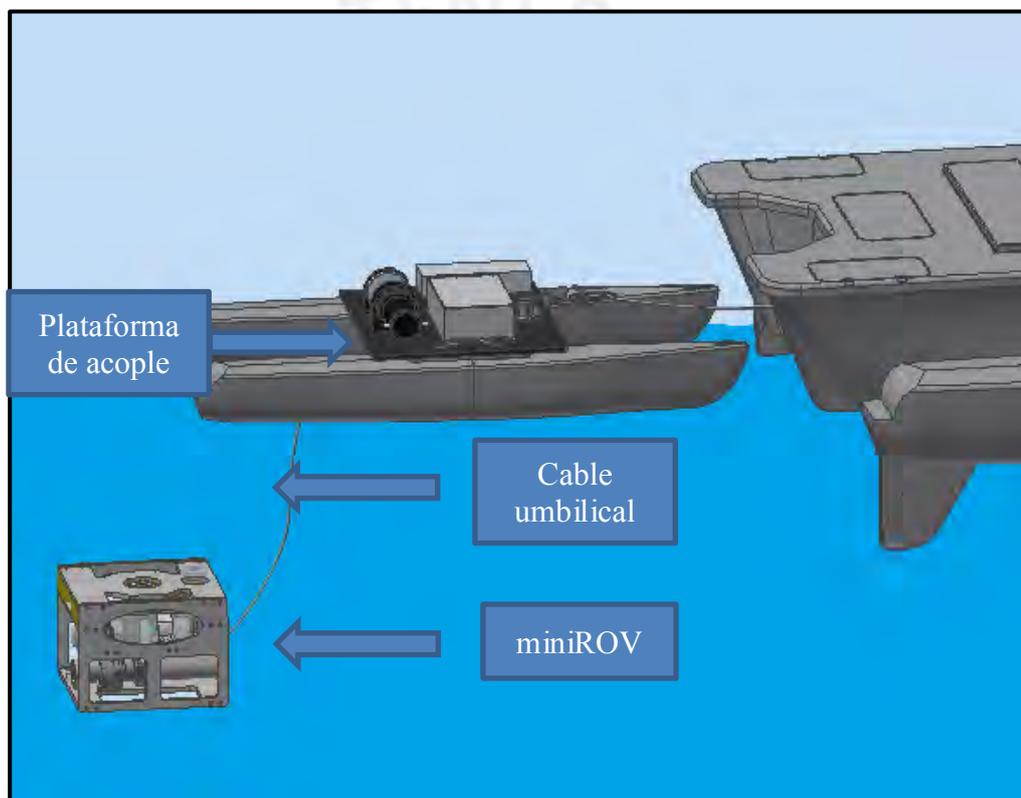


Figura 2. 2: Diseño del sistema mecatrónico
Fuente: Elaboración propia.

El sistema consta de una plataforma que flota sobre la superficie del agua y un miniROV que se desplaza bajo el agua. Ambos elementos están unidos por un cable umbilical mediante el cual se envían y reciben datos. Cabe resaltar que la plataforma y el miniROV se complementan para llevar a cabo las tareas de monitoreo de la calidad del agua midiendo 4 de sus parámetros en simultáneo e inspección visual mediante una cámara. El primero se encarga de la alimentación del sistema y de la comunicación inalámbrica mientras que el segundo mide los parámetros del agua y

graba video en tiempo real. La plataforma se acopla a otros vehículos marino de superficie a través un gancho instalado en la parte frontal.

El miniROV está compuesto por un marco, un módulo de flotabilidad, un recipiente para proteger los componentes electrónicos y un subsistema de propulsión compuesto por 3 propulsores. Además, cuenta con un subsistema de iluminación, un subsistema de posicionamiento acústico y un subsistema de sensores. Este último consiste en una cámara para el video en tiempo real, un IMU para conocer la orientación del miniROV y una sonda multiparamétrica para medir parámetros definidos del agua.

El marco del miniROV está elaborado en base de planchas de 6 y 10 mm de espesor mientras que el módulo de flotabilidad consiste en 4 bloques de espuma ubicados en los 4 extremos de la parte superior del miniROV. El volumen de espuma a usar depende del peso del miniROV debido a que debe ejercer una fuerza de empuje mayor a la fuerza del peso. El recipiente donde se encuentran los componentes electrónicos está hecho de acrílico transparente de 6.5 mm de espesor y 222 mm de largo. Posee tapas de aluminio sujetadas con O-rings para evitar que se filtre el agua. En la Figura 2.3 se muestran diversas vistas del miniROV.

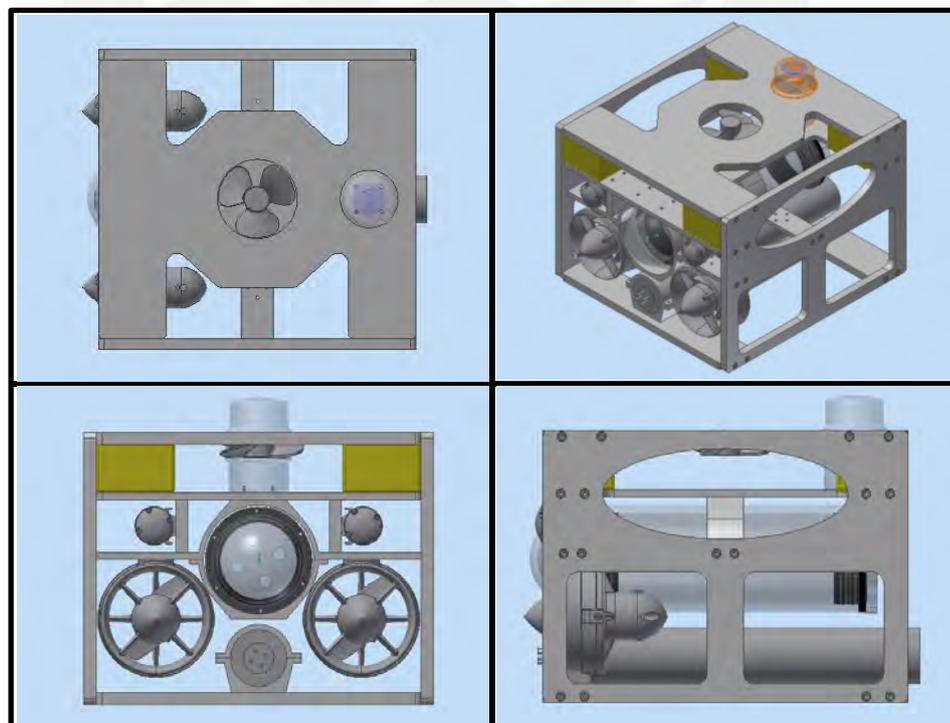


Figura 2. 3: Diseño del miniROV
a) Vista superior, b) Vista isométrica, c) Vista frontal y d) Vista lateral
Fuente: Elaboración Propia

Este vehículo submarino ha sido diseñado para operar en profundidades de hasta 10 m y medir diferentes parámetros a la vez que graba video en tiempo real. Sus 3 propulsores permiten realizar todos los movimientos mencionados en la lista de requerimientos. El miniROV tiene una autonomía de 2 horas y usa 4 baterías de 14.8V y 10000 mAh, las cuales se encuentran ubicadas en la plataforma. En la Figura 2.4 se presentan algunas vistas de esta plataforma.

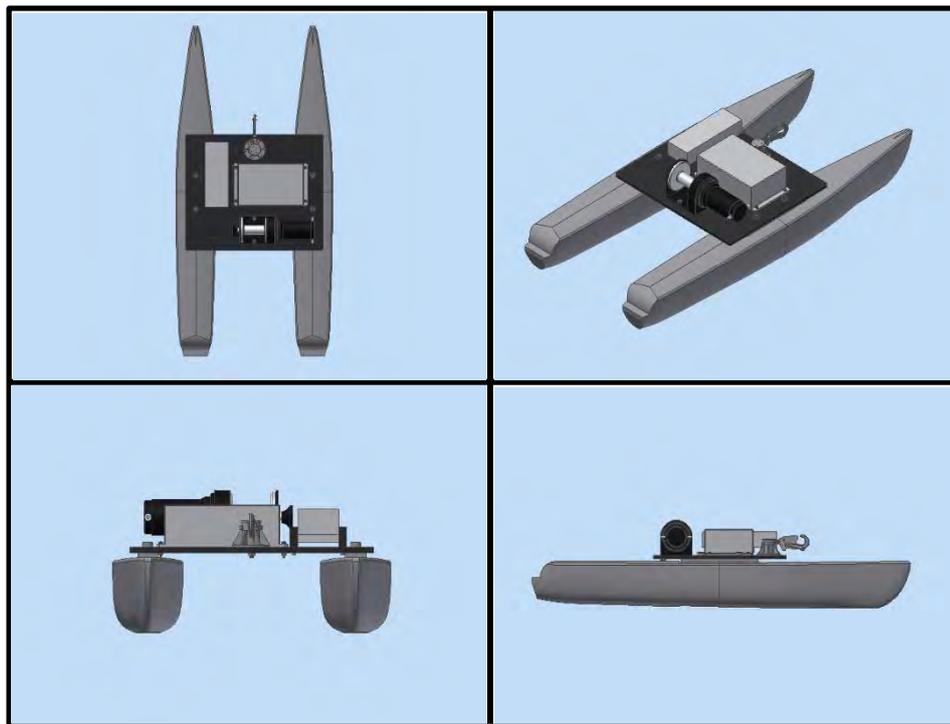


Figura 2. 4: Diseño de la plataforma
a) Vista superior, b) Vista isométrica, c) Vista frontal y d) Vista lateral
Fuente: Elaboración Propia

En el caso de la plataforma, cuenta con dos cascos laterales de fibra de vidrio que brindan el empuje necesario para mantenerlo a flote, además de un banco de baterías, un cabrestante y un punto de acceso inalámbrico que se encarga de la comunicación por Wifi. El alcance de transmisión será de 200m con una potencia de 500 mW, El banco de baterías se encuentra protegido dentro de una caja sellada hecha de plástico ABS que cuenta con protección IP65. El cabrestante encargado del ascenso y descenso del miniROV está hecho de aluminio y el motor que va acoplado es a prueba de agua. A pesar de su tamaño compacto y que se alimenta con solo 12VDC, la potencia máxima que ofrece el motor es de 600W. Por último, el emisor Wifi que va montado sobre un soporte, en este caso una barra de acrílico de 15 mm de diámetro,

de esa manera se procura obtener mayor alcance. Cabe resaltar que este dispositivo cuenta con certificación IPX5 por lo que es a prueba de agua.

2.4 Sistema mecánico

La estructura mecánica del miniROV permite acceder de forma simple al recipiente donde se encuentran los dispositivos electrónicos, de esa forma se puede reemplazar o dar mantenimiento a algunos elementos de ser necesario. También se debe tener en cuenta la implementación de un sistema de flotación en la parte superior del miniROV. De esta forma se procura que el vehículo flotaré ante alguna falla eléctrica que deje inoperativos los propulsores. Además, es muy importante realizar una adecuada elección del material con el que se fabrique el marco del vehículo submarino porque esto afecta directamente al peso y costo del miniROV. A continuación, en la Tabla 2.1 se muestra un resumen de materiales generalmente usados en la fabricación de ROVs.

Tabla 2. 1: Materiales usados en la fabricación de ROVs.
Fuente: Elaboración propia

Materiales	Stock	Precio (\$/kg)	Densidad(kg/m ³)	Resistencia a la fluencia (Mpa)
POM (Polioximetileno)	5 mm	18.6	1390	71.5
Acrílico PMMA	3,4,5 mm	21.6	1200	45
PVC rígido	-	10.2	1300	40.7
HDPE	-	9.4	952	21
Policarbonato compacto	-	24.1	1200	65.5
Aluminio 6061-T6 (AISI/ASTM)	-	12.6	2700	300
ABS-M30	-	9.4	1020	30

El acrílico PMMA ofrece una alta resistencia a la intemperie y al rayado, el policarbonato es el más fácil de trabajar y moldear por ser un termoplástico. Estas 3 opciones se rechazan debido a su alto precio. Por otro lado, el aluminio parece ser la mejor opción porque es de bajo costo y presenta la mayor resistencia de entre todas las opciones, pero al ser muy denso, la estructura terminaría siendo pesada. Entre el PVC y el HDPE se elige el segundo debido al precio, la resistencia a la fluencia no

es un factor decisivo al momento de elegir porque el miniROV será usado para el monitoreo de aguas muy poco profundas (<15 m).

En la Figura 2.5 se detallan las dimensiones del miniROV y se muestran las vistas lateral, superior y frontal.

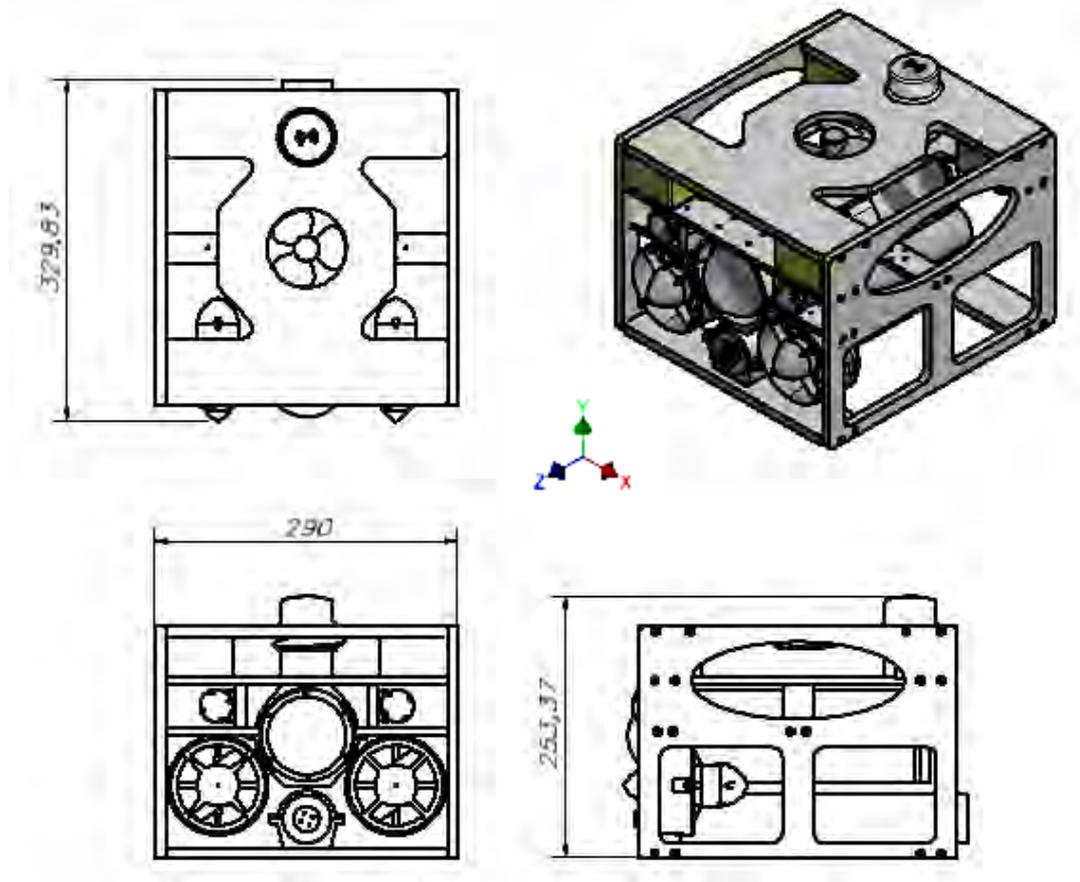


Figura 2. 5: Dimensiones del miniROV.
Elaboración: Fuente propia

Como se muestra en la figura, el diseño tiene la forma de un paralelepípedo buscando mayor estabilidad y facilidad de fabricación a la vez que se busca que el miniROV sea compacto. La masa de este vehículo es de 3.983 kg. Cabe resaltar que se busca que el centro de gravedad se encuentre ubicado en la parte central inferior del miniROV y que el centro de flotación se encuentre en la parte central superior ya que influye directamente en su estabilidad. Todas las uniones atornilladas serán con pernos M4 y M3.

En la Figura 2.6 se detalla la ubicación de cada subsistema que constituyen al miniROV.

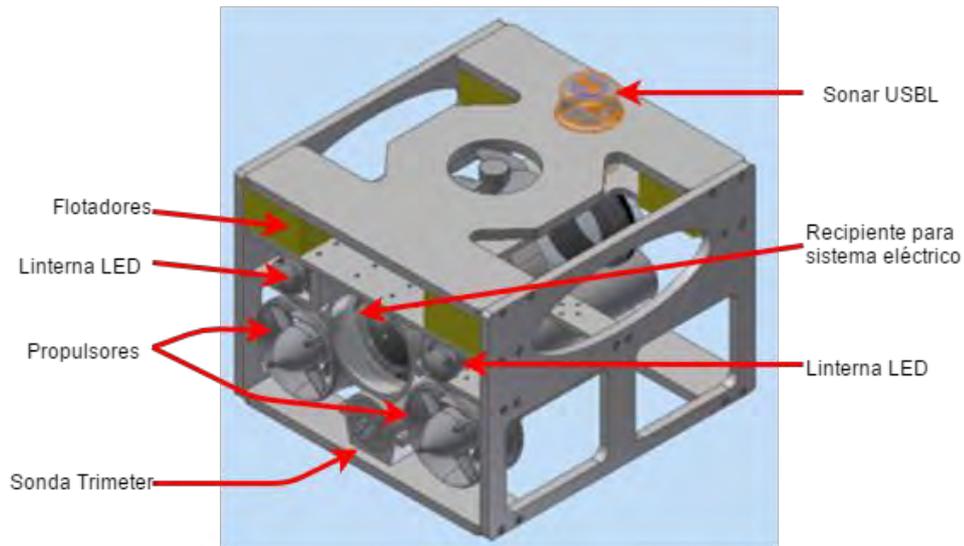


Figura 2. 6: Subsistemas del miniROV
Elaboración: Fuente propia

Por otro lado, para el diseño de la plataforma se usaron otros materiales como la fibra de vidrio para hacer los cascos. Se escogió este material por su gran resistencia a la corrosión, bajo costo y alta resistencia al impacto. La plataforma donde van montados las baterías, el receptor para la comunicación inalámbrica y el cabrestante está fabricado de POM de 10 mm de espesor. Se eligió este material por su alta resistencia, porque no es tan pesado como el aluminio ni costoso como el policarbonato.

En la Figura 2.7 se detalla la ubicación de los componentes que constituyen la plataforma. Mientras que en la Figura 2.8 se detallan las dimensiones de la plataforma y se muestran las vistas lateral, superior y frontal

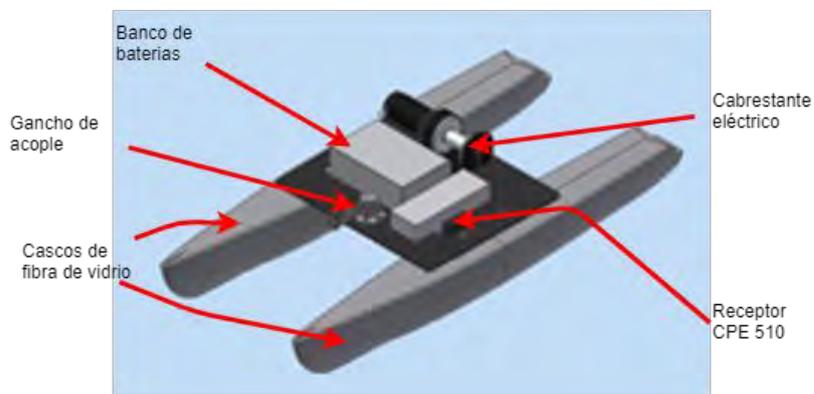


Figura 2. 7: Componentes de la plataforma
Elaboración: Fuente propia

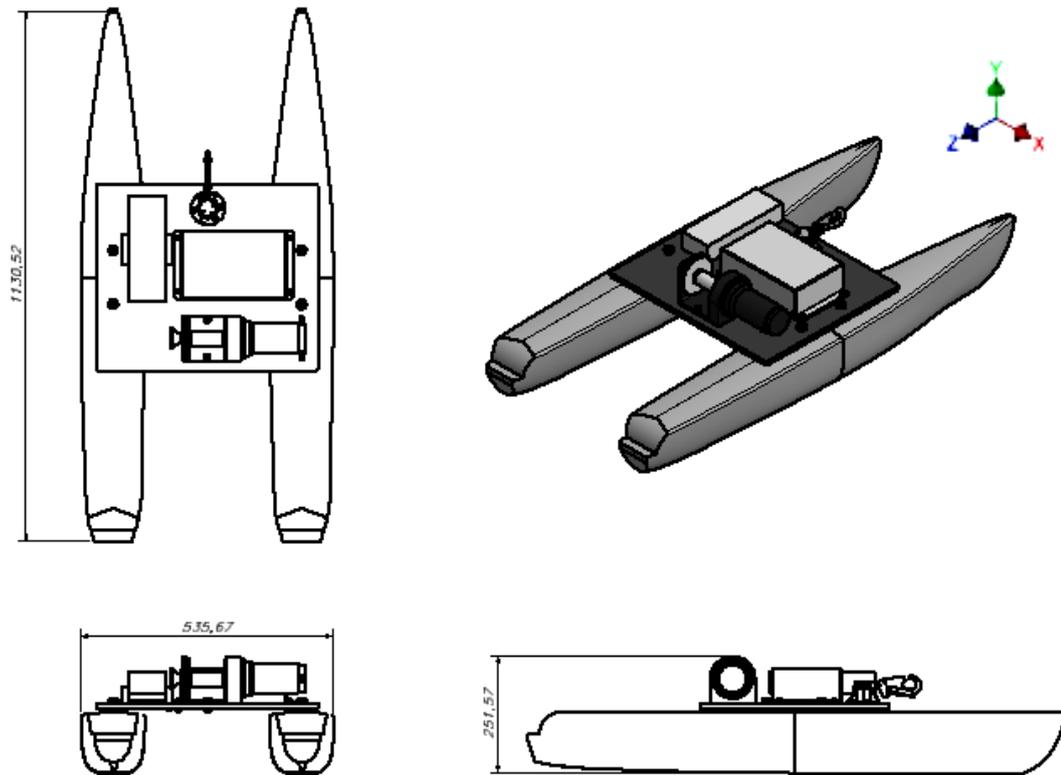


Figura 2. 8: Dimensiones de la plataforma.
Elaboración: Fuente propia

Los cascos son los encargados de mantener la plataforma a flote, la razón por la que son alargadas y tienen su punta en forma de V es para poder desplazarse en aguas tranquilas ya que rompe mejor las olas pequeñas. También es necesario tener en cuenta cuál será la altura sumergida del casco para compensar el peso de la plataforma. Por último, se debe considerar que a mayor distancia entre casco y casco el sistema será más estable.

2.4.1 Recipiente para proteger el sistema electrónico

Dimensionamiento del depósito del sistema electrónico:

Para realizar el dimensionamiento de este recipiente, se debe tener en cuenta el tamaño de todos los componentes que van dentro de este depósito. La siguiente tabla muestra todos los elementos que deben ser protegidos del agua y su respectivo tamaño.

Tabla 2. 2: Componentes electrónicos que van dentro del recipiente submarino
Fuente: Elaboración propia

Componente	Dimensiones (mm)	Peso (g)	Cantidad
Raspberry Pi 3	85 x 54 x 20	45	1
Arduino Mega	102 x 53 x 20	37	1
Basic 30A ESC	48x 18x13	27	1
IMU	32.7 x 21.7 x 10.6	10	1
Sensor de corriente y voltaje	4 x 15 x 19	7	1
Regulador de voltaje UBEC	41.6 x 16.6 x 7	7.5	2
Fathom-X Tether Interface Board	64 x 46 x 20	15	1
Raspberry Pi Camera 2	25 x 24 x 5	3	1

En base a estos datos se halló que el tamaño de recipiente cilíndrico a usar debe tener un radio interno de al menos 3" y la disposición de componentes será como se muestra en la Figura 2.9.

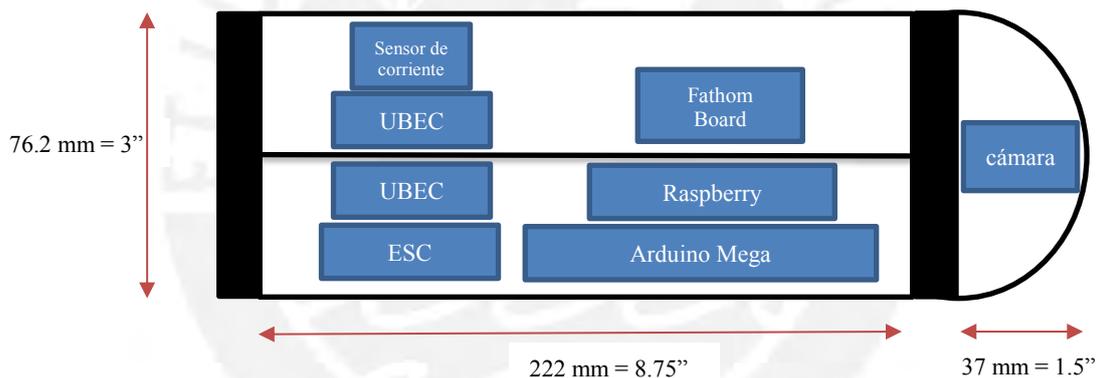


Figura 2. 9: Distribución de componentes dentro de contenedor electrónico.
Fuente: Elaboración Propia

Todo el sistema electrónico montado en el miniROV debe estar protegido del agua. Es por eso que en base a las medidas de los dispositivos que componen el sistema electrónico del miniROV se dimensionó un recipiente cilíndrico con una base semiesférica. Este recipiente consta de un tubo de acrílico transparente (A) de 222 mm de largo y 6.5 mm de espesor el cual en un extremo está unido a una tapa semiesférica (B) que es donde se ubicará la cámara, mientras que en el otro extremo posee una tapa de plana con agujeros (C). Estos agujeros son los que permiten pasar los cables de alimentación e información. Para asegurarnos que el agua no entrará al depósito se usa una junta de brida de aluminio anodizado (D) que se acopla al tubo

de acrílico y se sella con 2 O-rings. En la Figura 2.10 se muestra como está conformado el recipiente que protege al sistema eléctrico del agua.

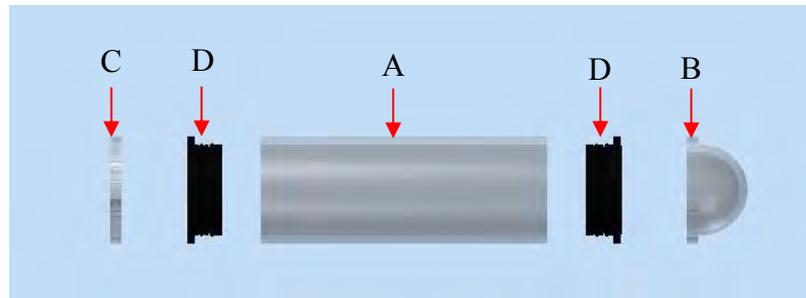


Figura 2. 10: Depósito para el sistema electrónico
Fuente: Elaboración propia

2.4.2 Marco del miniROV

El marco del miniROV consiste en planchas de 6 y 10 mm de grosor que sirven para sujetar todos los componentes electrónicos y aportar en la estabilidad del vehículo al desplazarse debajo del agua.

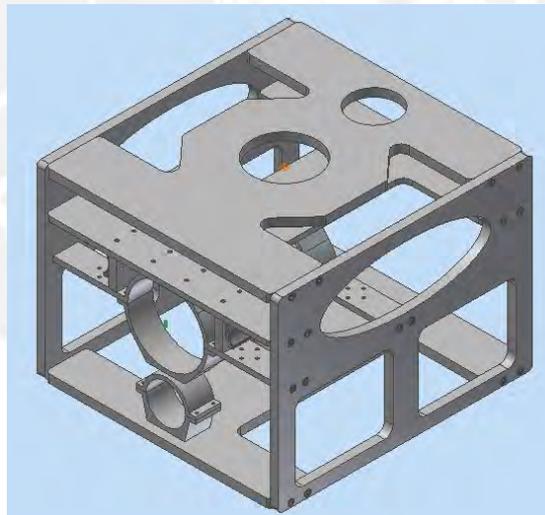


Figura 2. 11: Marco del miniROV
Fuente: Elaboración Propia

Como se aprecia en la Figura 2.11, el marco cuenta con soportes para el recipiente donde se ubican los componentes electrónicos y la sonda. 2 soportes laterales y 3 soportes horizontales. Para sujetar la sonda, se usaron 2 agarraderas en la parte inferior del miniROV, estas agarraderas se ensamblan usando tornillos M3 y se ajustan al diámetro de la sonda. Usando los dos pares de agarraderas se evita que la

sonda deslice. En la figura 2.12 se muestran las agarraderas diseñadas para sujetar la sonda multiparamétrica.

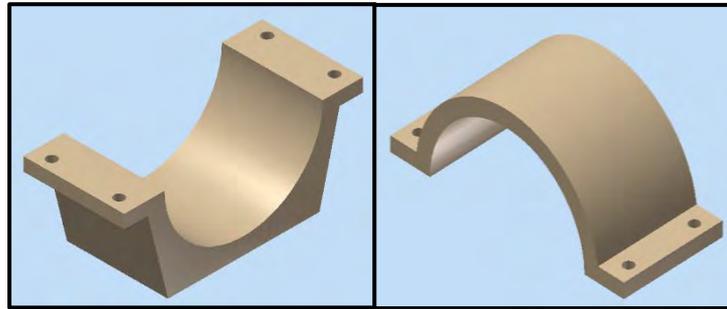


Figura 2. 12: Soportes para la sonda multiparamétrica Trimeter
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, para sujetar el recipiente cilíndrico donde se encuentran los componentes electrónicos se usaron soportes parecidos a los mostrados anteriormente. En la figura 2.13 se muestran las agarraderas usadas para sostener el recipiente de acrílico.

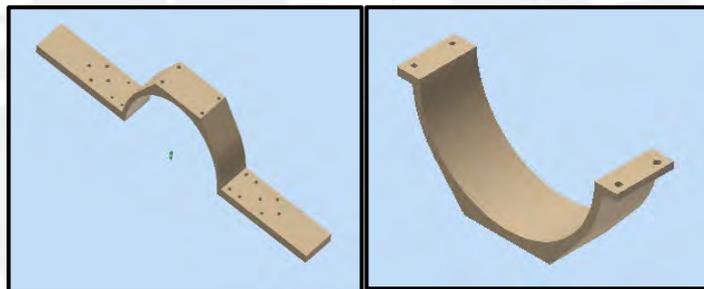


Figura 2. 13: Soportes para el recipiente de componentes electrónicos
Fuente: Elaboración propia

También se usaron soportes laterales para sostener y dar mayor estabilidad a los soportes horizontales añadidos al diseño. Además, se protege a los propulsores y a la sonda Trimeter de ser golpeados al momento de realizar alguna inspección debajo del agua. En la Figura 2.14 se detalla la forma de los soportes laterales usados,

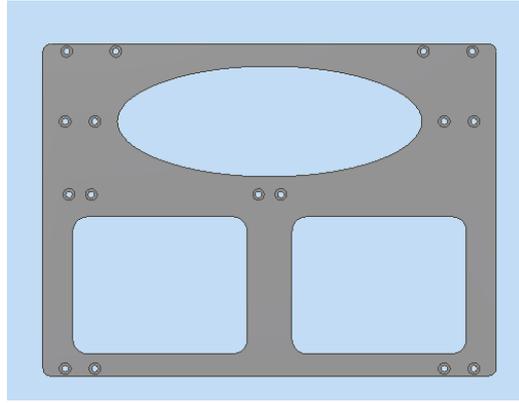


Figura 2. 14: Soporte lateral
Fuente: Elaboración propia

Se diseñaron también soportes horizontales que es donde van montados algunos componentes electrónicos como el Micron Sonar, los propulsores T100 y las linternas LED. En la Figura 2.15 se muestran los soportes horizontales usados en el diseño del miniROV.

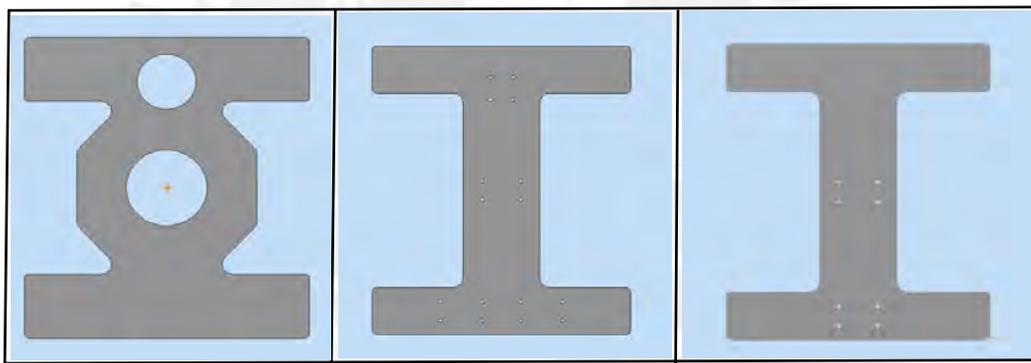


Figura 2. 15: Soportes horizontales superior, medio e inferior de la estructura del miniROV
Fuente: Elaboración propia

2.4.3 Subsistema de flotabilidad del miniROV

Ante cualquier desperfecto que pueda ocurrir con el miniROV durante su desplazamiento debajo del agua como el desenergizamiento de los propulsores, es necesario contar con un método que ayude a extraer el miniROV del agua. Por este motivo, se implementa un sistema de flotabilidad. Si es que la fuerza de flotación es mayor a la fuerza de hundimiento del ROV, entonces este tenderá a ascender hacia la superficie. Por lo tanto, lo que se busca es que la flotabilidad del vehículo sea positiva (>4.412 N para vehículos pequeños). Por lo que se debe cumplir la siguiente fórmula:

$$\sum \text{Fuerzas de flotación} > \text{Peso total del miniROV}$$

$$E + P > W$$

Donde:

E: Fuerza de empuje hallado por el principio de Arquímedes.

P: Fuerza resultante del sistema de flotación implementado en el miniROV.

W: Peso total del miniROV.

Como primer paso, se halla la fuerza de empuje E usando el principio de Arquímedes:

$$E = \rho * g * V$$

Donde:

ρ : densidad del fluido (kg/m^3)

g: gravedad (m/s^2)

V: volumen de fluido desplazado (m^3)

Tomando la densidad del agua como 1000 kg/m^3 , la gravedad como 9.81 m/s^2 y el volumen del miniROV obtenido del modelo hecho en Inventor se obtiene la fuerza de empuje de la siguiente manera:

$$E = 1000 * 9.81 * 0.00377$$

$$E = 36.98 \text{ N}$$

El peso total del miniROV es de 39.07 N y se quiere que la flotabilidad del miniROV sea de al menos 4.412 N , por lo tanto, la fuerza resultante del sistema de flotación debe ser de:

$$P = 39.07 + 4.412 - 36.98 = 6.502 \text{ N}$$

A su vez se cumple que:

$$P = \rho_{\text{agua}} * g * V_{\text{flotadores}}$$

$$V_{\text{flotadores}} = 6.628 * 10^{-4} \text{ m}^3$$

Para evitar añadirle más peso al miniROV se usan flotadores de espuma de poliuretano que tienen una densidad muy baja (35 kg/m^3). De esta forma solo se estaría añadiendo 0.22 N de peso al sistema. Finalmente, se dimensionan los 4 flotadores a usar y se obtiene un tamaño de $50 \times 39.5 \times 84 \text{ mm}$ por flotador.

2.4.4 Sub sistema de propulsión del miniROV

Para hallar la potencia de los propulsores, es necesario conocer cuál es la fuerza de arrastre que el agua ejerce sobre el miniROV y en el cable umbilical.

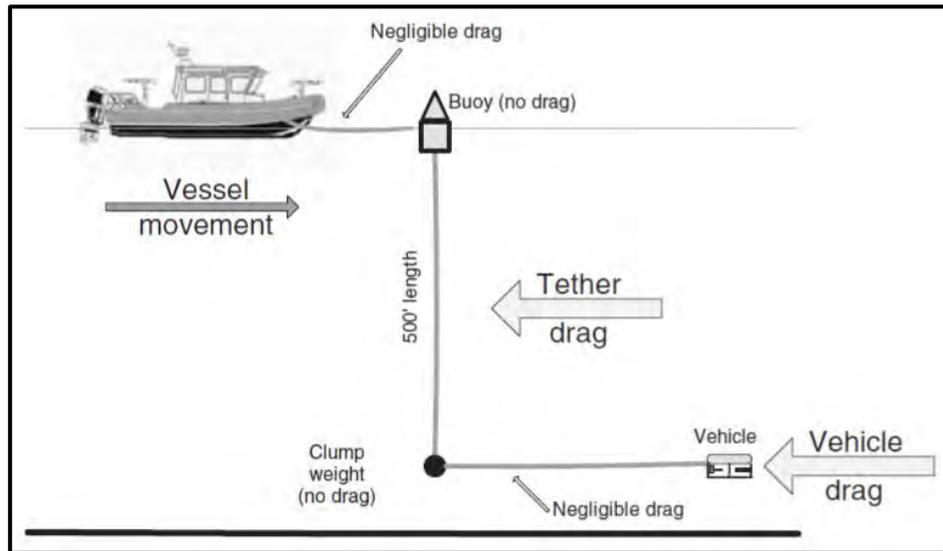


Figura 2. 16: Arrastre producido por el miniROV y el cable umbilical
Fuente: The ROV manual [31]

Arrastre producido por el miniROV:

Se obtiene resolviendo la siguiente fórmula:

$$Arrastre_{vehículo} = \frac{1}{2} * \sigma * A * V^2 * Cd$$

Donde:

σ : Densidad del agua de mar/Aceleración de la gravedad

A: Área transversal del frente del vehículo

V^2 : velocidad en pies/segundo del miniROV

Cd : Coeficiente de arrastre

La densidad del agua es de 1025 kg/m^3 y la aceleración de la gravedad se tomará como 9.8 m/s^2 . Para hallar el área transversal del frente del vehículo se puede tomar el valor del volumen del miniROV elevado a la $2/3$. La velocidad máxima a la que se desplazará el vehículo es de 1.5 m/s según los requerimientos del diseño. Por otro lado, el coeficiente Cd depende de la forma del miniROV por lo que en este caso será de 1.05 debido a su forma de paralelepípedo.

Reemplazando datos:

$$Arrastre_{vehículo} = \frac{1}{2} * \frac{1025}{9.8} * 0.0271 * 1.5^2 * 1.05 = 3.35 \text{ kg}$$

Arrastre producido por el cable umbilical:

Se obtiene resolviendo la siguiente fórmula:

$$Arrastre_{cable} = \frac{1}{2} * \sigma * A_u * V_u^2 * C_{d_u}$$

Donde:

σ : Densidad del agua de mar/Aceleración de la gravedad

A_u : Diámetro del cable * longitud perpendicular a la corriente

V_u^2 : velocidad en pies/segundo del cable umbilical

C_{d_u} : Coeficiente de arrastre

Para hallar el valor de A_u se necesita el diámetro del cable umbilical y la longitud perpendicular a la corriente. Para este último valor se tomará la longitud perpendicular máxima que podrá tener el cable, es decir 10 m. El diámetro del cable umbilical a usar es de 7.6 mm, además la velocidad del cable será la misma que la del miniROV. Por último, el valor del coeficiente C_{d_u} será de 0.2.

Reemplazando valores:

$$Arrastre_{cable} = \frac{1}{2} * \frac{1025}{9.8} * 0.0076 * 10 * 1.5^2 * 0.2 = 1.79 \text{ kg}$$

Ahora se obtiene el arrastre total:

$$Arrastre_{total} = Arrastre_{miniROV} + Arrastre_{cable}$$

$$Arrastre_{total} = 3.35 + 1.79 = 5.14 \text{ kg}$$

Por último, para hallar la potencia de los propulsores se usa la siguiente fórmula:

$$Potencia = Arrastre_{Total} * V = 7.71 \frac{\text{kg} * \text{m}}{\text{s}} = 75.61 \text{ W}$$

En base a la potencia necesaria para mover al miniROV, además de tomar en cuenta las dimensiones y peso de los propulsores se compararon 3 modelos de propulsores para ROVs submarinos (Tabla 2.3). Se eligió usar propulsores T100 de la compañía Blue Robotics, estos propulsores tienen una duración de hasta 2400 horas y pueden trabajar en aguas contaminadas sin inconvenientes. A continuación, en la Figura 2.17 se muestran sus gráficos de rendimiento.

Tabla 2. 3: Características generales de propulsores para ROVs
Fuente: Elaboración propia

Modelo	T100	600HF Hi-Flow Thruster	Tecnadyne Model 150
Dimensiones (mm)	102 x 100 D	304 x 86.36 D	226 x 79 D
Peso (g)	295	907	700
Potencia máxima (W)	135	150	125
Empuje máximo (N)	23.14	71.29	20.59
Voltaje de operación (VDC)	6 - 16	12 - 50	12 - 48
Empresa	Blue Robotics	Robotics CrustCrawler	Tecnadyne
Página Web	https://www.bluerobotics.com/	http://www.crustcrawler.com/	http://tecnadyne.com/

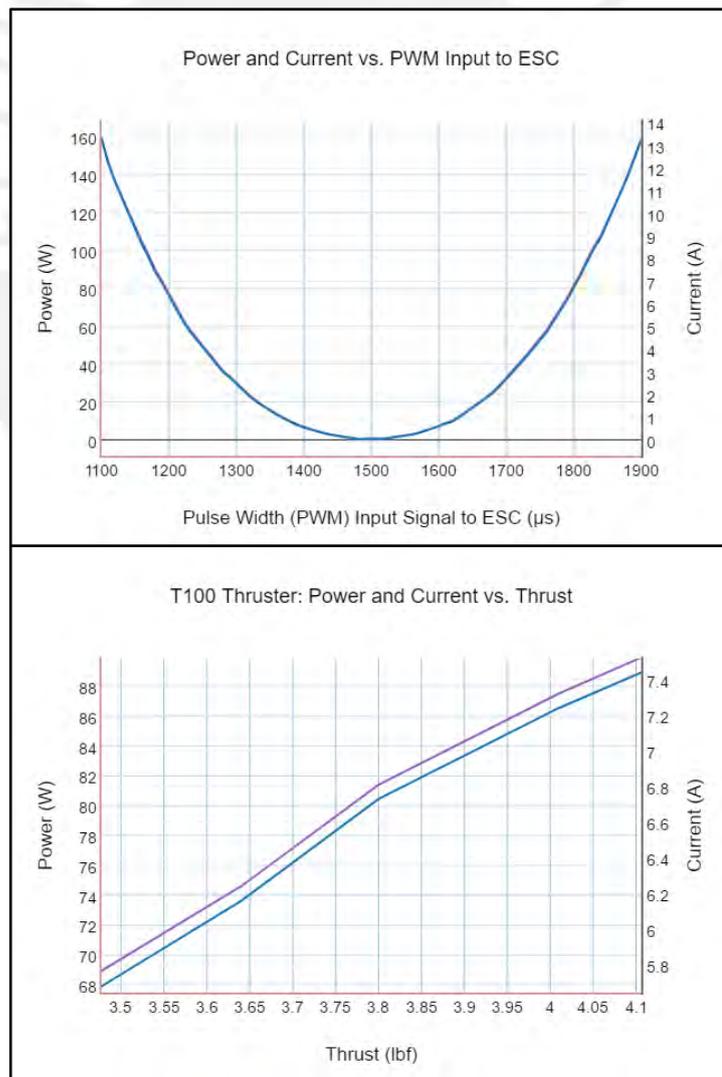


Figura 2. 17: Gráficos de rendimiento del propulsor T100
Fuente: Blue Robotics



Figura 2. 18: Propulsor T100
Fuente: Blue Robotics

2.4.5 Estabilidad de l mini ROV

Es necesario que el miniROV presente una estabilidad positiva longitudinal y lateral y los factores que afectan la estabilidad son:

Aspect Ratio: es un indicador que determina la estabilidad del vehículo en base a sus dimensiones. Mientras mayor sea este indicador, mayor será la estabilidad del miniROV.

$$\text{Aspect Ratio} = \frac{\text{Longitud total del vehículo}}{\text{Ancho total del vehículo}}$$

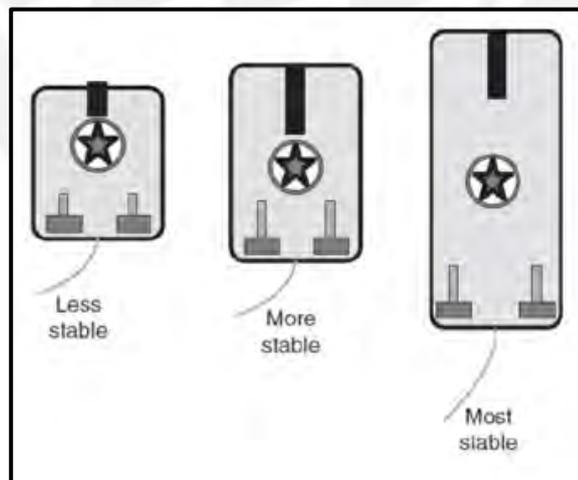


Figura 2. 19: Estabilidad del vehículo en base a sus dimensiones
Fuente: The ROV manual [31]

Para el caso del miniROV diseñado, el aspect ratio será:

$$\text{Aspect Ratio} = \frac{329.83}{290} = 1.137$$

Analizando el valor obtenido, al ser mayor a 1 significa que nuestro ROV presenta gran estabilidad, aunque se recomienda que el valor del aspect ratio sea de 1.5 si es que el vehículo va a trabajar a altas velocidades.

Posicionamiento de los propulsores: Al usar dos propulsores, se procura que estos se encuentren separados lo máximo posible para disminuir el balanceo que ocurre al desplazar el miniROV debajo del agua. Pero cuando se trabajan con velocidades menores a los 2m/s este factor no afecta de forma significativa el funcionamiento del miniROV.

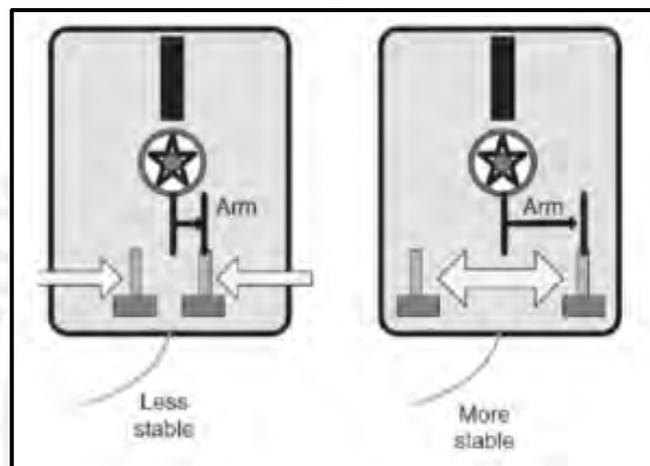


Figura 2. 20: Estabilidad del vehículo en base a la posición de los propulsores
Fuente: The ROV manual [31]

2.4.5.1 Estabilidad estática del miniROV:

La estabilidad estática del miniROV se analiza suponiendo que no hay movimiento de agua. Por lo que la estabilidad del miniROV está regida por la posición de su Centro de Flotación (C_B) y el Centro de masa (C_M o CG). Si es que ambos centros se encuentran alineados verticalmente entonces serán estables debido a que no se crea ningún momento que afecten la estabilidad.

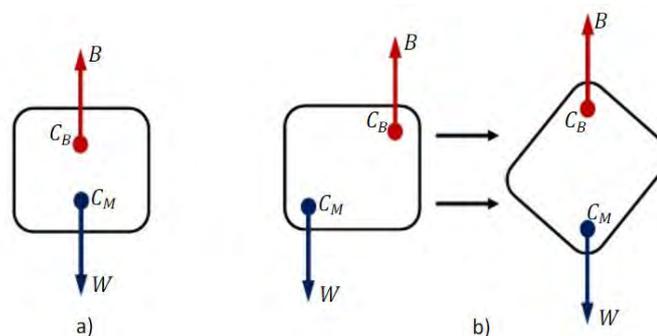


Figura 2. 21: a) Configuración estable de un cuerpo submarino. b) Inestabilidad de un cuerpo submarino causada por desalineamiento entre los centros de masa y flotabilidad.
Fuente: Diseño conceptual de Vehículo Operador Remotamente para la exploración de cavernas [31]

Analizando el peso de todos los elementos del miniROV se obtiene la altura a la que se encuentra el CG tomando como referencia la base horizontal inferior. Del mismo modo, se halla el CB en base a los pesos y ubicación de los flotadores. El Centro de Flotación se encuentra a una altura de 195 mm y el Centro de masa a 104 mm. Ambos están alineados verticalmente.

2.4.5.2 Estabilidad Transversal del miniROV:

Al momento de desplazarse sobre el agua, los propulsores ejercen un momento sobre el ROV que hace que pierda estabilidad, a la misma vez el peso del mismo miniROV ejerce otro momento con sentido contrario que lo contrarresta. De esa manera se procura que el miniROV se enderezará por cuenta propia.

El momento causado por los propulsores horizontales es el siguiente:

$$M_p = 2x F_p x d$$

Donde F_p es la fuerza ejercida por los propulsores cuando el miniROV se mueve a su máxima velocidad (1.5 m/s) y d es la distancia entre los propulsores y el centro de flotación. Según los cuadros de rendimiento de los propulsores, para que cada uno ejerza 37.08 W de potencia, la fuerza de propulsión sería de 2.35 lb-f aproximadamente, que equivale a 10.45 N. Y la distancia entre los propulsores y el centro de flotación es de 129 mm.

$$M_p = 2 x 10.45 x 129 = 2696.1 N - mm$$

Ahora se procede a calcular hasta que ángulo tendrá que inclinarse el miniROV para estabilizarse:

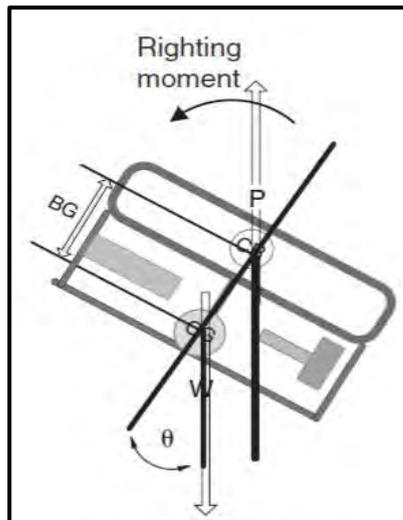


Figura 2. 22: Momento de enderezado del miniROV.
Fuente: The ROV manual [31]

$$M_o = W * BG * \sin \theta$$

Donde:

M_o = Momento de enderezado del miniROV

W = Peso del miniROV

BG = Distancia entre CB y CG

θ = Ángulo de inclinación

El momento M_o deberá ser igual a M_p , de esa forma se halla hasta que ángulo θ se inclina el miniROV al avanzar.

$$2696.1 = 39.07 * 135 * \sin \theta$$

$$\theta = 30^\circ$$

Como se demostró, si el miniROV se mueve a su máxima velocidad, tenderá a inclinarse un ángulo de 30° lo cual no afecta significativamente el desplazamiento ni la trayectoria del miniROV.

2.4.6 Diseño de los cascos de la plataforma

Se usó el procedimiento explicado en el Capítulo 7 del libro “Basic Ship Theory” [32] para el diseño de cascos. Lo primero que se deberá hacer es definir los

parámetros que serán de utilidad para realizar los cálculos. En la figura 2.23 se muestran dichos parámetros.

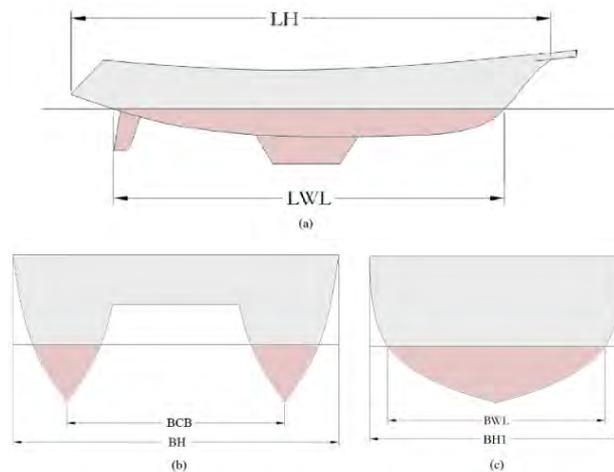


Figura 2. 23: Parámetros relevantes para el diseño de cascos.
Fuente: <http://marine.marsh-design.com/content/length>

Donde:

LH: Longitud del casco (m)

LWL: Longitud del plano de agua (m)

BWL: Ancho del plano del agua (m)

También es necesario conocer otros parámetros como el área del plano del agua (A_w), el volumen desplazado y la altura sumergida (T_c). La carga máxima (mLDC) que pueden soportar los cascos se halla haciendo uso del principio de Arquímedes:

$$E = \rho * g * V$$

En este caso, E será la carga máxima mLDC multiplicado por la gravedad y V será el volumen desplazado por ambos cascos, la fórmula quedaría de la siguiente forma:

$$mLDC = \rho_{agua} * V$$

Se debe tener en cuenta la masa de los componentes montados sobre la plataforma (Tabla 2.4). Tomando la densidad del agua como 1000 kg/m^3 se procede a reemplazar los datos en la fórmula para saber el volumen que deberán desplazar los cascos de la plataforma.

$$V = \frac{12.264 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.012264 \text{ m}^3$$

Tabla 2. 4: Masa de componentes de la plataforma
Fuente: Elaboración propia

Componentes	Cantidad	Masa por unidad (kg)	Masa total
Cabrestante eléctrico	1	7	7
Caja de plástico ABS	1	0.543	0.543
CPE510	1	0.320	0.320
Plataforma	1	1.482	1.482
Baterías Lipo	3	973	2.919
			12.264

Por lo hallado anteriormente se infiere que el volumen desplazado por cada casco debe ser de 0.006132 m^3 . Analizando la forma del casco en Inventor, se obtiene que el volumen que se desplazará a una altura sumergida (T_c) de 75 mm será de 0.006421 m^3 por lo que la plataforma se mantendrá a flote.

2.5 Sistema electrónico

El esquema de conexiones del sistema electrónico de la plataforma y el miniROV mostrado en la Figura 2.24 cuenta con módulos de comunicación inalámbrica, módulo de sensores, módulos de actuadores y fuente de alimentación. Todos los componentes que conforman el siguiente esquema fueron seleccionados después de que sus características principales de funcionamiento fueran comparadas. Este proceso de selección será descrito a detalle en las siguientes páginas.

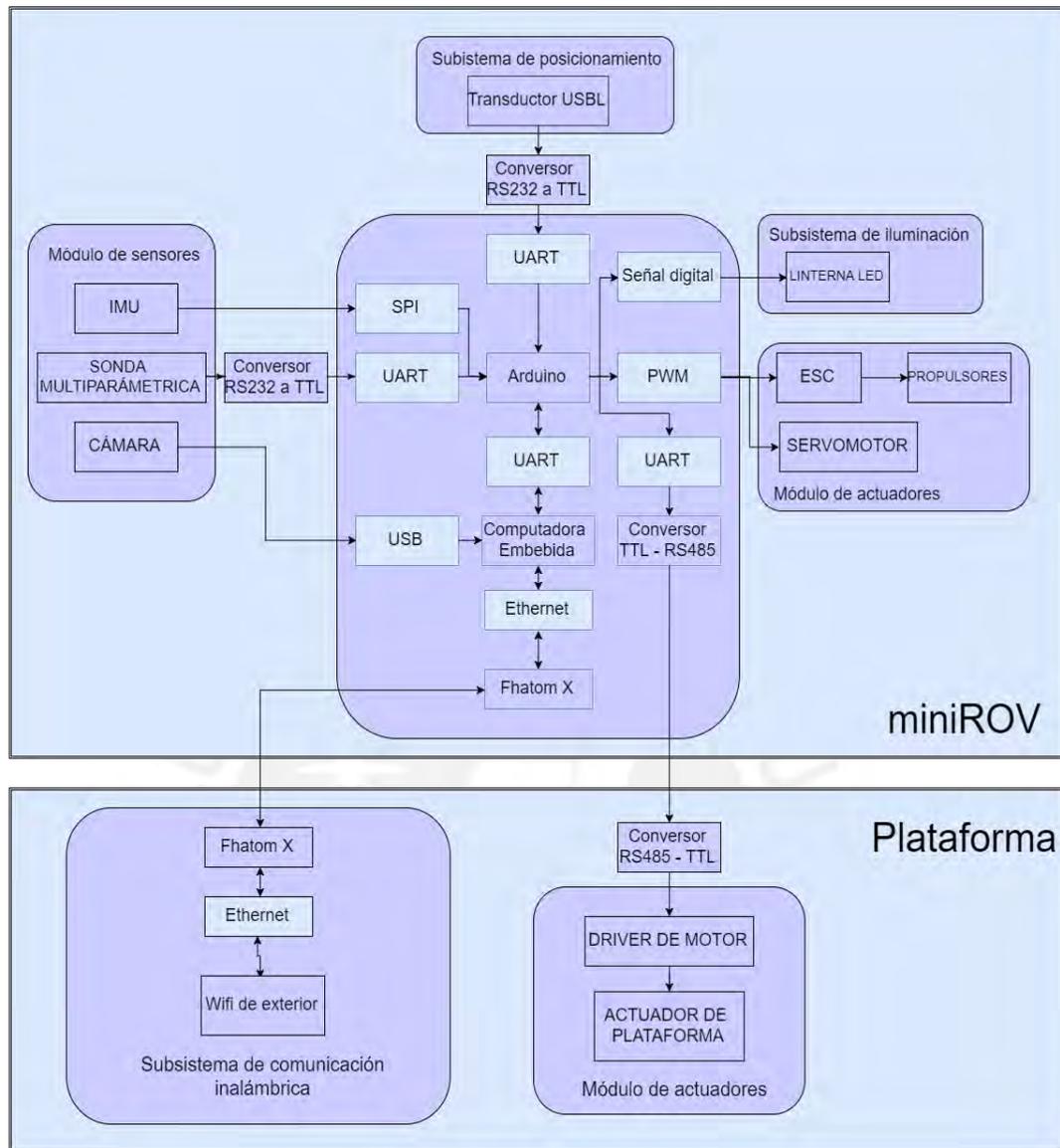


Figura 2. 24: Esquema de conexión entre los componentes del sistema
Fuente: Elaboración propia

2.5.1 Módulo de sensores

El objetivo principal del diseño de la plataforma y el miniROV es el monitoreo e inspección de la calidad del agua por lo que es esencial contar con un conjunto de sensores que permitan medir parámetros del agua y a la vez capturar video en tiempo real. Además, con el fin de conocer la velocidad y orientación del miniROV se usa un IMU (Unidad de Medición Inercial). A continuación, se describen las características de los sensores considerados en el diseño.

2.5.1.1 Sensor Inercial

Un IMU (Inertial Measurement Unit) está compuesto principalmente de acelerómetro y giroscopios que permiten conocer la velocidad, aceleración y orientación de distintos tipos de vehículos como vehículos aéreos no tripulados, vehículos autónomos submarinos (AUV) y vehículos operados remotamente (ROV), etc. En la tabla 2.5 se muestran las principales características de algunos modelos de IMU.

Tabla 2. 5: Comparación de principales características de sensores inerciales
Fuente: Elaboración propia

	ADIS16460	ADIS16445	ADIS16334	ADIS16365
Voltaje de operación	3.3V	3.3V	5V	5V
Corriente	44mA	74mA	49mA	49mA
Dimensiones	22.x22.4x9 mm	24.1x37.7x10.8 mm	32.7x21.7x10.6 mm	23x23x23 mm
Sensores incluidos	3 axis Accelerometer, 3 axis Gyro			
Grados de libertad	6	6	6	6
Precio	\$159	\$325	\$336	\$386
Giroscopio				
Ruido	0.075 °/s	0.22 °/s	0.8 °/s	0.8 °/s
Rango Dinámico	+/- 100 °/s	+/- 250 °/s	+/- 300 °/s	+/- 300 °/s
No linealidad	0.50%	0.10%	0.10%	0.10%
Acelerómetro				
Ruido	4.5 mg	2.25 mg	5 mg	9 mg
No linealidad	0.10%	0.20%	0.10%	0.10%
Rango Dinámico	5 G	5 G	5 G	18 G

Se descartan los sensores que operan con un voltaje de operación de 3.3V para de esa manera uniformizar voltajes y evitar el uso de reguladores adicionales. Por otro lado, entre los dos modelos de IMU que restan, se observa que ambos tienen las mismas características en casi todos los aspectos, pero difieren en el volumen que ocupan. Es por este motivo que se elige el modelo “ADIS16334” mostrado en la Figura 2.25, este módulo será ubicado dentro del recipiente electrónico del miniROV.



Figura 2. 25: Sensor Inercial ADIS16334.
Fuente: Analog Devices.

2.5.1.2 Cámara

La cámara es un dispositivo esencial para la inspección visual del fondo marino, para el diseño a implementar se ha considerado usar un servomotor para mover la cámara sobre el eje Y del miniROV (Figura 2.5), de 60 a -60° por lo que el ángulo de visión no se tomará en cuenta. La resolución de la cámara es muy importante porque a mejor resolución, el análisis cualitativo del video obtenido será más preciso, por tal razón se eligió la Raspberry Pi camera V.2 (Figura 2.26) debido a que permite capturar video con una resolución de 8MP a diferencia de las otras cámaras analizadas que solo llegan a 5MP.

Otra característica a tomar en cuenta es la compatibilidad con la computadora embebido a usar, en este caso, con el Raspberry Pi 3 por lo que su implementación es simple. Por último, la cámara elegida presenta el doble de FPS que las otras opciones, esto significa que la imagen se actualiza 2 veces más rápido por segundo por lo tanto el video será más fluido y se obtendrá mayor información. Y su ubicación será en el recipiente de componentes electrónicos mostrado en la Figura 2.9. A continuación, en la Tabla 2.6 se muestran las características principales de las cámaras comparadas.

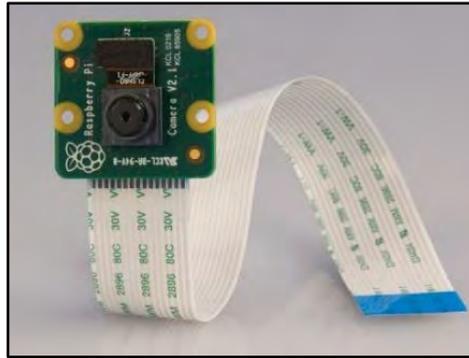


Figura 2. 26: Raspberry Pi camera V.2
Fuente: Raspberry Pi

Tabla 2. 6: Características de las cámaras comparadas
Fuente: Elaboración propia

Modelo	Raspberry Pi camera V.2	5MP AutoFocus CMOS camera module	OV5642 1080P JPEG Camera Module
Sensor de imagen	Sony IMX219	OV5640	OV5642
Resolución	8 MP	5 MP	5MP
Tamaño de pixel	1.12 um x 1.12 um	1.4 um x 1.4 um	1.4 um x 1.4 um
Tamaño	36x36x13 mm	44 x 25.5x 41 mm	No especifica
Video modes	1080p30 720p60 VGA90	1080p30 720p60 VGA90	1080p30 720p60 VGA60
Frames	30	15	15
Frecuencia de reloj de entrada	6 a 27 MHz	6 a 27 MHz	6 a 27 MHz

2.5.1.3 Sonda multiparamétrica

Para medir los parámetros del agua generalmente se tiene que emplear un sensor por parámetro, es por eso que se usan sondas multiparamétricas las cuales poseen una serie de sensores que pueden ser intercambiados según el parámetro que se quiera medir. Generalmente las sondas tienen formas cilíndricas donde en un extremo se montan los diversos sensores a usar mientras que en el extremo opuesto es donde se conectan los cables de alimentación y envío de información. En la Tabla 2.7 se muestran características de diferentes sondas, los criterios a tomar en cuenta para la elección es que el largo de la sonda debe ser menor a 35 cm y la resolución de sus sensores deben ser menores a 0.01.

Tabla 2. 7: Características de sondas multiparamétricas

Fuente: Elaboración propia

Modelo	YSI 6600 V2	CTD 48	Trimeter
Diametro (cm)	8.9	4.8	4.7
Largo (cm)	49.8	45	34.3
Peso (kg)	3.18	1.5	1
Conductividad			
Rango (mS/cm)	0 a 100	0 a 70	0 a 275
Resolución (mS/cm)	0.001 a 0.1	0.001	0.001
Temperatura			
Rango (°C)	-5 a 50	-2 a 36	-5 a 50
Resolución (°C)	0.01	0.005	0.01
pH			
Rango (unidades)	0 a 14	4 a 10	0 a 14
Resolución (unidades)	0.01	0.0002	0.01
Profundidad			
Rango	0 a 9.1 m	<6000dbar	0 a 10 m
Resolución	0.001m	0.002 % fs	0.01

Se eligió la sonda Trimeter de la compañía Eureka mostrada en la Figura 2.27 debido a que es más compacta y liviana que las otras opciones analizadas. Además, en cuanto a conductividad ofrece un mayor rango frente a otras sondas.



Figura 2. 27: Sonda multiparamétrica Trimeter
Fuente: Eureka

2.5.2 Subsistema de posicionamiento acústico

El sistema de posicionamiento es el medio por el cual se obtendrá información de la posición en la que se encuentra el ROV en todo momento. En el campo de la oceanografía generalmente se usan sistemas de posicionamiento acústicos: USBL, SBL (Short Base Line) y LBL (Long Base Line) como se explicó anteriormente en el capítulo 1. Debido a que el sistema a diseñar (plataforma de acople y miniROV) presenta un tamaño menor que el de un bote pequeño (< 1.5 de largo y ancho) se usa un sistema USBL. Mediante este sistema, un sonar acoplado a la parte inferior de un

vehículo marino envía pulsos de sonido hacia un receptor montado en el miniROV. Una vez que el pulso llega al receptor, este automáticamente envía otro pulso de regreso y en base al tiempo que le tomo al emisor enviar el primer pulso y recibir el segundo pulso, se calcula la posición del miniROV debajo del agua. Es importante la frecuencia con la que trabaja el dispositivo a usar porque a mayor frecuencia significa que se envían más pulsos por segundo, lo que aumenta la resolución del resultado. Se requiere tener una resolución menor a 0.1 m y un peso menor a 1 Kg. El sonar implementado en el miniROV será un Micro Sonar de la compañía Trittech el cual está hecho para ROVs pequeños por lo cual presenta un tamaño y peso menor al de las otras opciones analizadas. A continuación, se presentan algunas características de sonares ofrecidos en el mercado en la Tabla 2.8 y en la Figura 2.28 se presenta el sonar elegido.

Tabla 2. 8: Características principales del sonar Micron
Fuente: Elaboración propia

Modelo	S2CR 48/78	S2CR 18/34	S2CR 15/27	Micron Sonar
Material	Resina Acetal	Resina Acetal	Resina Acetal	No especifica
Profundidad de operación (m)	200	200	200	75
Frecuencia de operación (kHz)	48-78	18-34	15-27	700
Dimensiones	130 mm x 145 mm	130 mm x 145 mm	175 mm x 145 mm	56 mm x 79 mm
Peso en aire	1090 g	730 g	1090 g	324 g
Alimentación	12-24 VDC	12-24 VDC	12-24 VDC	12-48 VDC
Resolución	0.01 m	0.01 m	0.01 m	0.0075 m



Figura 2. 28: Sonar Micron
Fuente: Trittech

2.5.3 Subsistema de iluminación

Para realizar una inspección del fondo marino de manera óptima es necesario contar con un sistema de iluminación que ayude al monitoreo en aguas con poca luz o que contengan muchas partículas en suspensión. Además, si se quiere grabar video con alta resolución se necesita una buena iluminación del entorno. Por lo cual se usará un sistema de iluminación el cual consisten en montar 2 linternas LED en la parte delantera del miniROV que apunten hacia donde la zona que la cámara va a filmar. Al montar las linternas se tiene que compensar añadiendo peso en la parte trasera del miniROV para que el centro de masa del mismo se encuentre en el medio. Por lo tanto, el peso se convierte en un factor determinante al momento de elegir la linterna a usar.

La linterna Lumen Subsea Light de la compañía Blue Robotics mostrada en la Figura 2.29 es la elegida porque cumple con los requisitos mencionados en los Requerimientos del Sistema (Capítulo 2.1). Trabaja en un rango de voltaje de 12 a 24 y su brillo máximo es de 1500 lumens. Cabe resaltar que su peso es significativamente menor al de las otras opciones. En la Tabla 2.9 se muestran las características de las linternas comparadas mientras que en las Figuras 2.29 y 2.30 se presenta la linterna escogida y su ubicación en el miniROV.

Tabla 2. 9: Características principales de linternas
Fuente: Elaboración propia

Modelo	Lumen Subsea Light	LED-G-Series	LED-K	MV-LED II
Voltaje de operación (VDC)	12 a 24	24	24	24
Brillo máximo (lumens)	1500	1600	600	3100
Profundidad máxima (m)	300	300	3000	6000
Largo (mm)	64.8	80.3	89	127
Diametro (mm)	32	47.8	76	88
Peso (g)	82	207	460	1100



Figura 2. 29: Linterna LED Lumen Subsea Light
Fuente: Blue Robotics

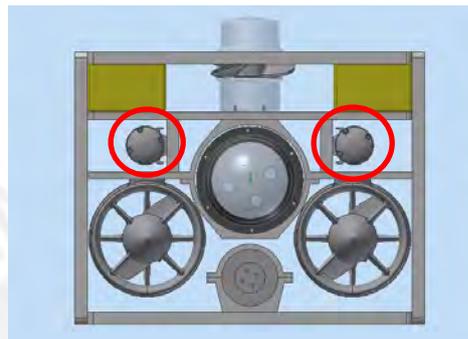


Figura 2. 30: Ubicación de las linternas LED en el miniROV
Fuente: Elaboración propia

2.5.4 Computadora embebida

La computadora embebida, ubicada en el recipiente de componentes electrónicos del miniROV (Figura 2.9), será la encargada de recibir los datos obtenidos por los sensores recopilados por la tarjeta Arduino y el video obtenido por la cámara. Esta información se envía a la estación base por medio de una antena wifi de exterior ubicada en la plataforma, el subsistema de comunicación se detalla en 2.4.5 Subsistema de Comunicación.

El dispositivo elegido es un Raspberry Pi 3 (Figura 2.31) debido al número de puertos USB con los que cuenta que podrían ser usados para conectar otros dispositivos. Otra razón importante por la que se escoge este embebido es por su compatibilidad con la cámara elegida anteriormente, la Raspberry Pi Camera V2 además de que existen librerías que hacen más simple la comunicación con un microcontrolador Arduino. En la siguiente Tabla 2.10 se muestran algunas características de esta computadora embebida.



Figura 2. 31: Raspberry Pi 3
Fuente: Element14

Tabla 2. 10: Características principales de sistemas embebidos
Fuente: Elaboración propia

Modelo	Raspberry Pi 3	Beaglebone Black	pcDuino Lite
Dimensiones (mm)	85x49	54x86	125x52
Peso (g)	45g	39.7g	no especifica
N° de puertos USB	4	1	1
Memoria RAM	1 Gb	512 Mb	512 Mb
Voltaje de operación	5VDC	5VDC	5VDC
CPU	1.2 GHz 64 bits quad-core ARMv8	AM335x1GHz ARM Cortex-8	1 GHz ARM Cortex A8

2.5.5 Subsistema de comunicación

Una vez que el Raspberry Pi 3 haya recolectado y procesado toda la información obtenida del sistema de sensores y posicionamiento, se procede a enviar la información mediante cables a una antena de exterior Wifi ubicada en la plataforma. Para evitar algún inconveniente debido a la longitud del cable umbilical se usa una tarjeta Fathom-X (Figura 2.32), la función de esta tarjeta es proveer una conexión de alta velocidad para distancias largas usando el módulo HomePlug AV.

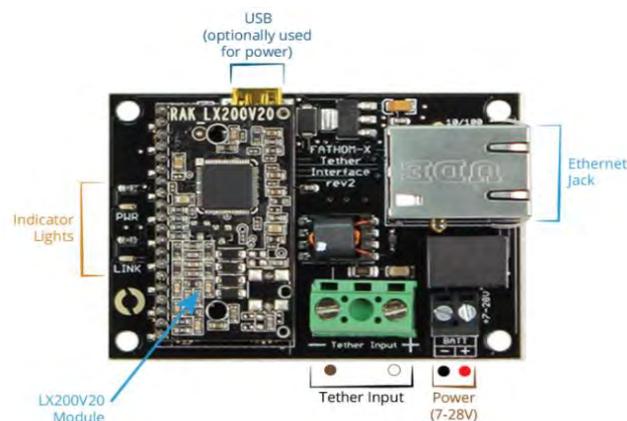


Figura 2. 32: Fathom-X Board
Fuente: Blue Robotics

Esta tarjeta se conecta a la Raspberry Pi a través del puerto Ethernet y por medio de un par de cables conectados en “Tether Input” envía la información a la plataforma. En la plataforma también se implementará otro Fathom-X para recibir la información y enviarla a la antena Wifi de exterior.

Para transmitir la información de manera inalámbrica en tiempo real se usa una red de área local inalámbrica (WLAN). Se tiene en cuenta que la conexión debe mantenerse hasta una distancia máxima de 200 m según los Requerimientos del Sistema (Capítulo 2.1).

Primero, se compararon diversos dispositivos que sirven para crear la red inalámbrica y se eligió el receptor CPE 510 de la compañía TP-Link que trabaja a una frecuencia de 5 GHz. Esta frecuencia pertenece al grupo de bandas que fueron declaradas de uso libre por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones [30] por lo que no se requiere una autorización para usarla. Además, al trabajar en bandas de 5 GHz de frecuencia se tiene menos interferencia porque es menor el número de equipos que trabajan a esta frecuencia a comparación de otras bandas de uso libre como la de 2.4 GHz. En la Tabla 2.11 se muestran características de receptores inalámbricos.

Tabla 2. 11: Características de los receptores inalámbricos
Fuente: Elaboración propia

Modelo	WBS210	CPE510	locoM2
Voltaje de operación (VDC)	24	24	24
Máxima distancia (Km)	30	50	5
Velocidad (Mbps)	300	300	150
Frecuencia (GHz)	2.4	5	2.4
Dimensiones (mm)	198 x 74 x 40	198 x 75 x 40	164x 199x 72
Protocolo	802.11 a/n	802.11 b/g/n	no especifica

El receptor será montado en la plataforma y se encargará de comunicarse con la estación base. El modelo a usar es el punto de acceso CPE510 (Figura 2.33), el cual es una antena direccional que soporta una comunicación de hasta 50 Km en áreas sin obstáculos.



Figura 2. 33: Receptor CPE510
Fuente: TP-Link

En el siguiente Diagrama de Comunicación (Figura 2.34) se detalla las conexiones entre los dispositivos mencionados anteriormente.

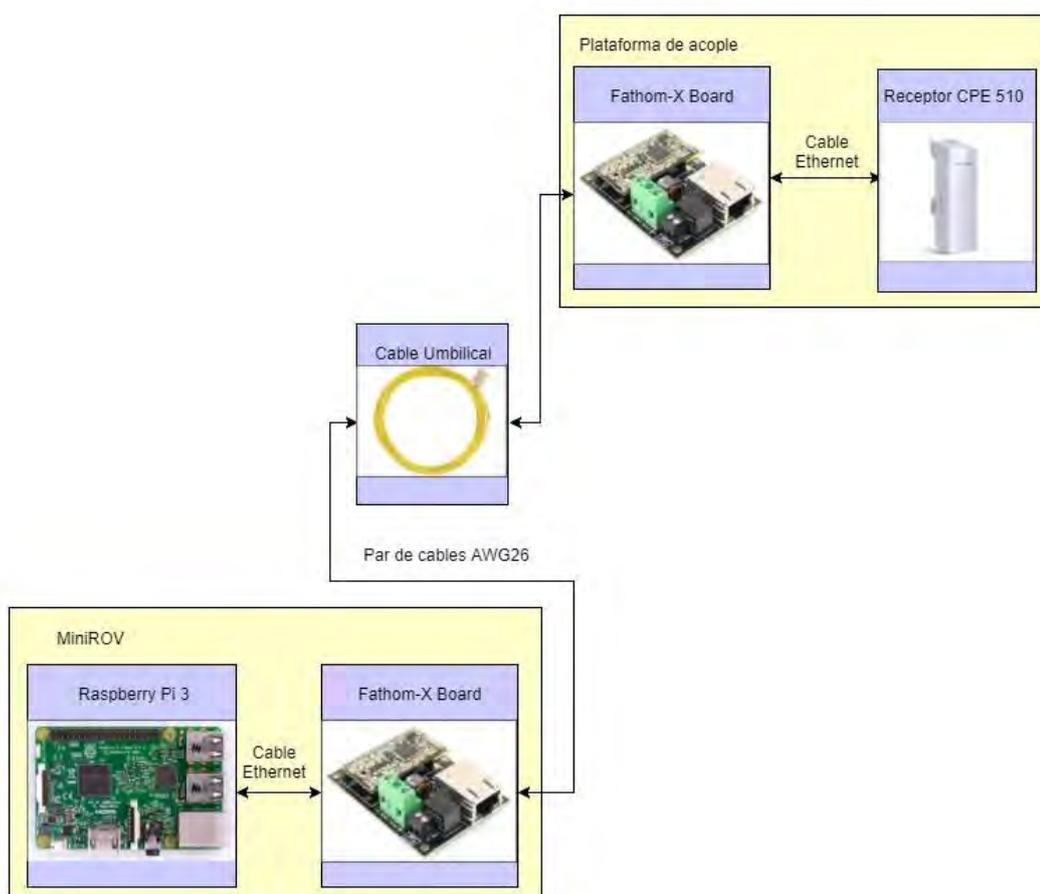


Figura 2. 34: Diagrama de comunicación
Fuente: Elaboración propia

2.5.6 Energización del sistema

La fuente de alimentación a usar será un banco de baterías recargables Lipo que estarán ubicados sobre la plataforma de acople. Para elegir la cantidad de baterías y el voltaje necesario para alimentar todo el sistema se procede a realizar algunos cálculos electrónicos. En la Tabla 2.12 se muestran los componentes que requieren ser alimentados con energía eléctrica y su consumo máximo de corriente. Posteriormente se halla el amperaje de las baterías en base al tiempo de duración del sistema especificado en la lista de requerimientos. Es necesario aproximar el tiempo que cada componente estará prendido para obtener un valor real del consumo de corriente del sistema. Por ejemplo: la Raspberry Pi 3 siempre estará operando por lo que su consumo de corriente es constante durante casi todo el tiempo de operación del sistema. Por otro lado, las linternas Lumen Subsea Light solo serán activadas cuando el miniROV está desplazándose debajo del agua y la cámara no pueda captar las imágenes con claridad.

Tabla 2. 12: Consumo de corriente del sistema
Fuente: Elaboración propia

Componente	Ubicación	Cantidad	Voltaje	Consumo de corriente por unidad	Consumo de corriente total
Raspberry Pi 3 + Cámara	MiniROV	1	5 V	1.5 A	1.5 A
Arduino Mega	MiniROV	1	5 V	0.1 A	0.1 A
Basic 30A ESC	MiniROV	3	5 V	500 mA	1.5 A
IMU ADIS16334	MiniROV	1	5 V	47 mA	0.047 A
Sensor de corriente y voltaje	MiniROV	1	5 V	50 mA	0.05 A
Trimeter	MiniROV	1	12 V	100 mA	0.1 A
Propulsores T100	MiniROV	3	12 V	3.00 A	9 A
Micron Sonar	MiniROV	1	12 V	300 mA	0.3 A
Lumen Subsea Light	MiniROV	2	12 V	900 mA	1.8 A
Receptor CPE510	Plataforma	1	12 V	700 mA	0.7 A
Motor cabrestante	Plataforma	1	12V	2.00 A	2.00 A
				Total	17.097 A

En total se necesitan 17.097 A como mínimo, y se pide que el sistema tenga una autonomía de 2 horas por lo que se realiza el siguiente cálculo:

$$Carga = Consumo de corriente * Duración de baterías$$

$$Carga = 17.097 A * 2 h$$

$$Carga = 34.194 Ah$$

Antes de elegir las baterías se debe tener en cuenta que estas se encuentran montadas en la plataforma y la energía eléctrica tiene que pasar a través del cable umbilical, por lo que existirá una pérdida de voltaje que se hallará a continuación.

Debido a que un requerimiento del sistema es que la profundidad máxima de trabajo del miniROV sea de 10 metros, el largo del cable será de al menos el doble del tamaño requerido, es decir será de 20 m. El tipo de cable a usar será del tipo AWG 12 cuyo diámetro es de 2.053 mm. Se emplea la siguiente fórmula para hallar la resistencia del cable:

$$R = p * L/A$$

Donde:

p: Resistividad del material (Ω *mm/m)

L: Longitud del cable (m)

A: Área transversal del cable (mm²)

El cable a usar será de cobre por lo que su resistividad es de 0.017 Ω *mm, reemplazando los datos se obtiene el siguiente resultado:

$$R = 0.017 * \frac{20}{3.31} = 0.103$$

Ahora se procede a hallar la caída de tensión usando la Ley de Ohm:

$$V_{perdido} = R * I$$

Donde I es la corriente consumida por los componentes electrónicos del miniROV, según lo mostrado en la Tabla 2.12 este consumo es de 14.397. Reemplazando los datos se obtiene lo siguiente:

$$V_{perdido} = 1.48$$

Finalmente se halla el número y configuración del banco de baterías, tomando en cuenta que la mayoría de los componentes del miniROV soportan 12V, en base a esa consideración se tiene lo siguiente:

$$V \text{ sistema} = 12 + 1.48 = 13.48 \text{ V}$$

$$Carga = 34.194 \text{ Ah}$$

Se eligen 3 baterías Lipo de 14.8 V (4 celdas) de 12 000 mAh conectadas en paralelo para alimentar al sistema. En la Figura 2.33 se muestra el Diagrama de distribución de Energía.

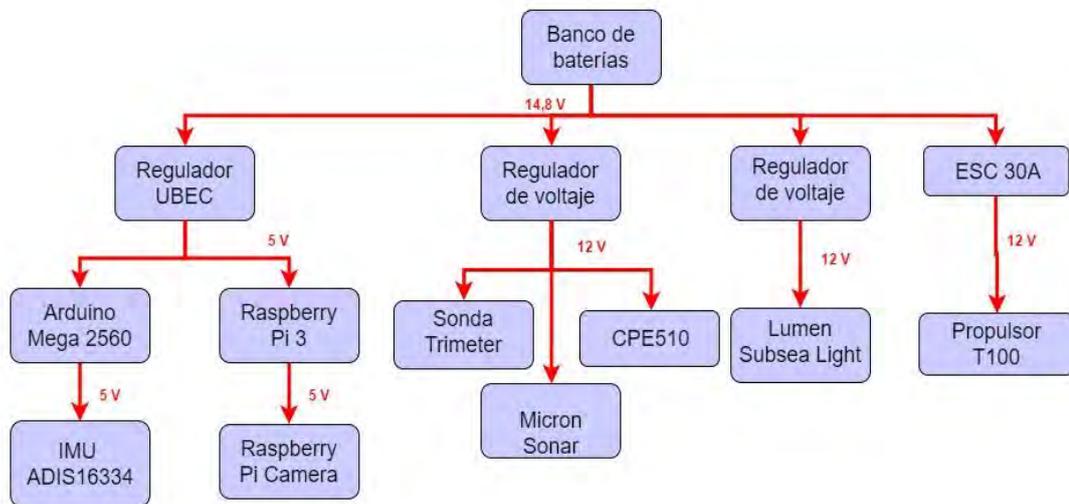


Figura 2. 35: Diagrama de distribución de energía
Fuente: Elaboración propia

Como se indica en el gráfico anterior, el Arduino y el Raspberry serán alimentados con un mismo regulador de voltaje UBEC que disminuye el voltaje de 14.8V a solo 5V. El sensor IMU será alimentado con la tarjeta Arduino mientras que la cámara será energizada por el sistema embebido Raspberry. Por otro lado, se usa un regulador de voltaje para obtener 12V de salida y de esa manera energizar la sonda Trimeter, el Micron Sonar y la antena CPE510. Se usa otro regulador de forma parecida a lo explicado anteriormente para alimentar exclusivamente al par de linternas Lumen Subsea Light debido a la cantidad de corriente que consumen. Por último, los propulsores T100 serán controlados por los controladores ESC de 30 A.

2.5.7 Diagrama Esquemático

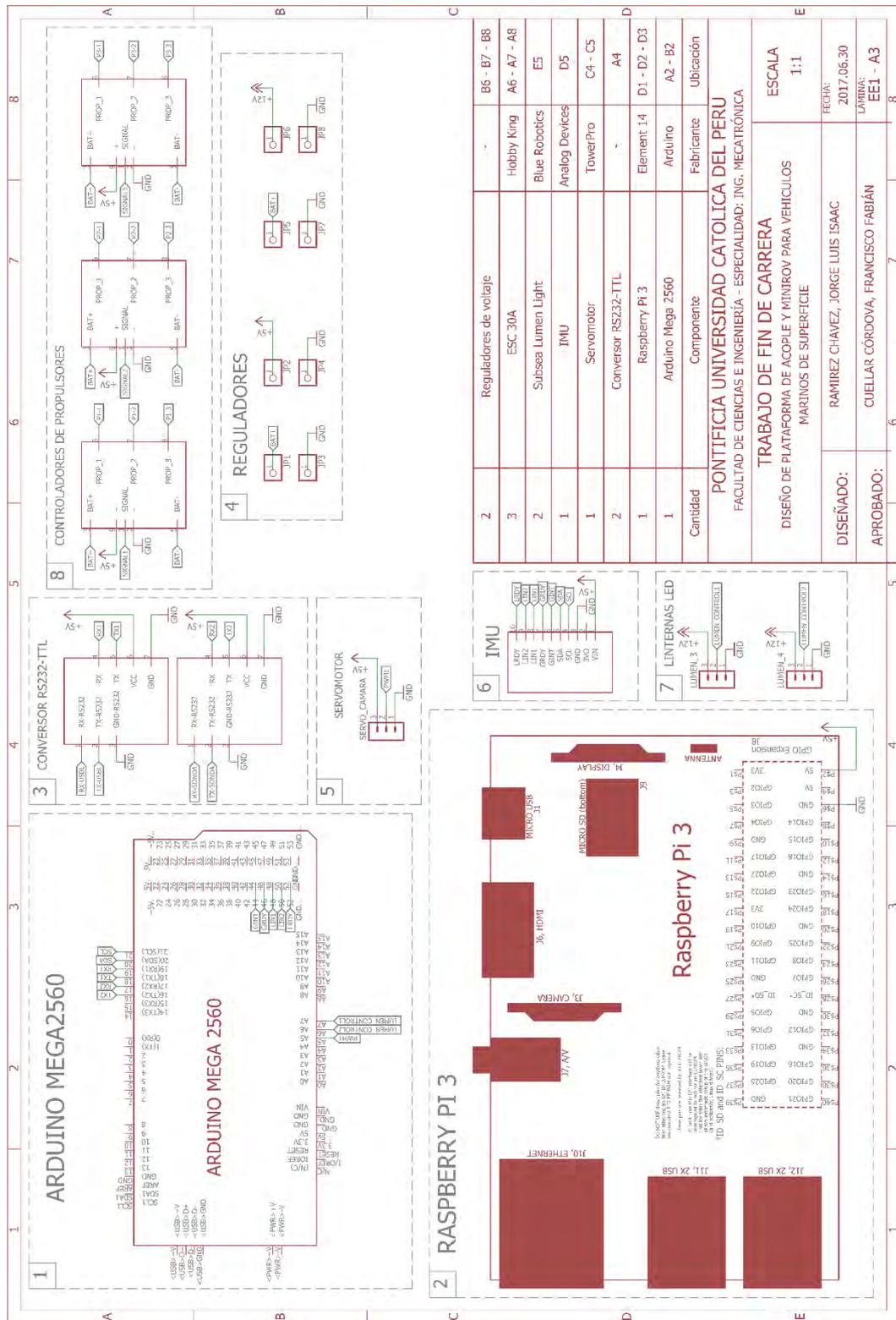


Figura 2. 36: Diagrama esquemático del sistema
Fuente: Elaboración propia

2.6 Diagramas de flujo del sistema

La lógica empleada para el funcionamiento del miniROV será implementada en el Raspberry Pi 3 usando el lenguaje de programación Python. El flujo del programa principal que se encargará del funcionamiento del sistema se muestra en la Figura 2.25.

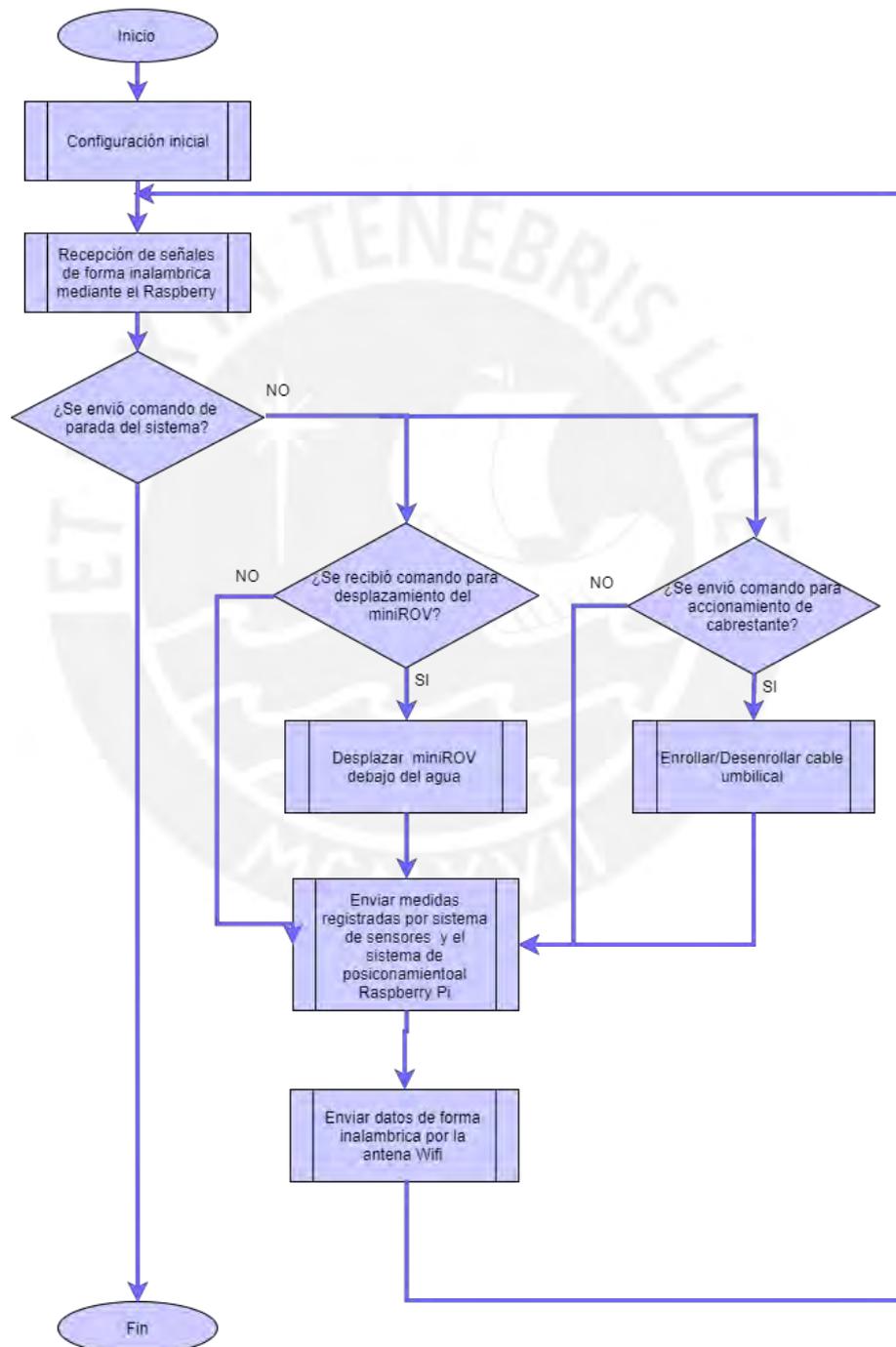


Figura 2. 37: Diagrama de flujo principal del sistema
Fuente: Elaboración propia

El flujo principal del programa inicia configurando los parámetros del agua que se van a medir, además de configurar ciertas variables necesarias para el sistema de comunicación inalámbrica y el sistema de posicionamiento acústico. Una vez que se ha logrado establecer la comunicación inalámbrica, el sistema comienza con la recepción de instrucciones para el accionamiento de los propulsores y motor del cabrestante montado sobre la plataforma de acople. En todo momento se recolectan los datos obtenidos por el sistema de sensores (sonda multiparamétrica, cámara, sensor IMU) y el sistema de posicionamiento acústico en el Raspberry Pi. Una vez que se han obtenido todos estos datos, se procede al envío de información de forma inalámbrica. Y se comienza con la recepción de una nueva instrucción donde es posible recibir una señal de parada que termina con el funcionamiento del sistema.

A continuación, se explicarán las sub-funciones presentadas en el programa principal. La configuración inicial de cada variable (Figura 2.36) inicializa los parámetros de cada dispositivo conectado: sonda multiparamétrica Trimeter, el transductor USBL, el IMU, el socket que permite la comunicación TCP/IP y los timers para el envío de señales PWM.

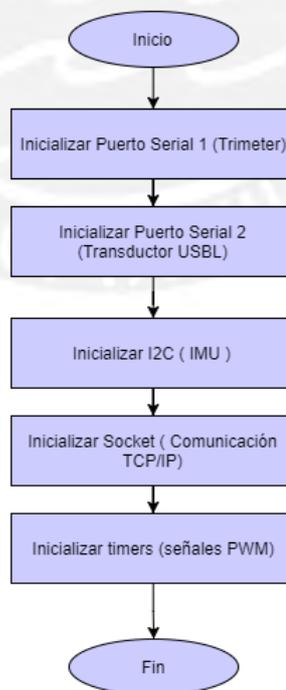


Figura 2. 38: Diagrama de flujo de Configuración Inicial
Fuente: Elaboración propia

Luego de configurar e inicializar el sistema, se procede a la recepción de datos de forma inalámbrica. Los comandos de navegación enviados inalámbricamente por el operador son recibidos mediante el CPE510 y decodificados por el Raspberry Pi 3. Este último se encarga de asignar valores a cuatro variables PWM, donde PWM1, PWM2 y PWM3 pertenecen a los propulsores del miniROV y PWM4 corresponde al motor del cabrestante montado en la plataforma.

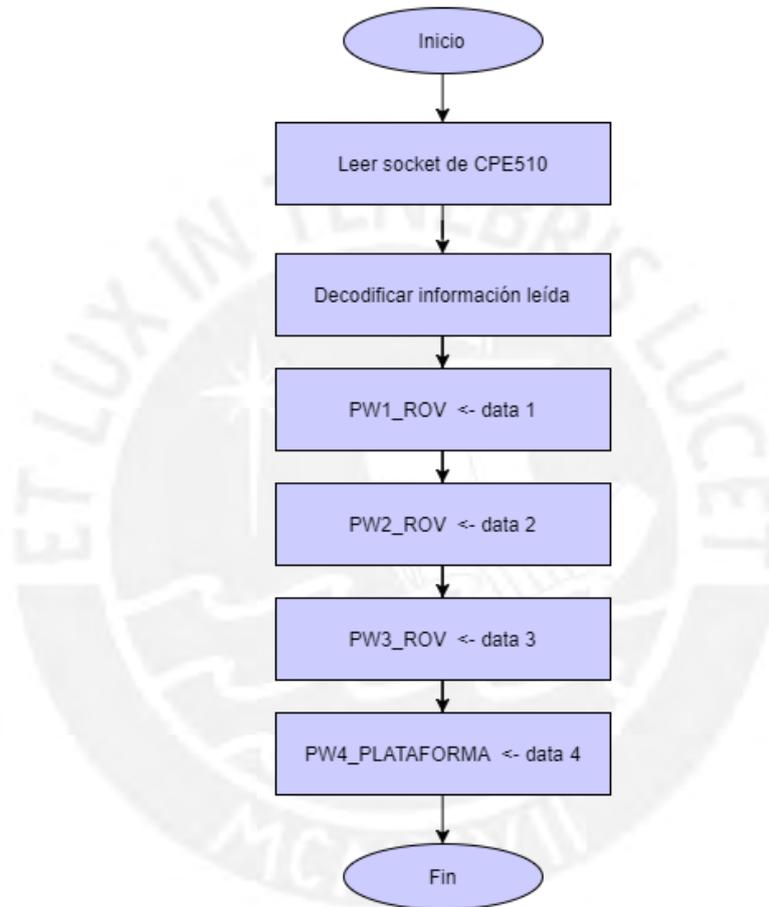


Figura 2. 39: Diagrama de flujo de la recepción de comandos de navegación
Fuente: Elaboración propia

El Raspberry Pi se encarga de enviar las variables PWM a la tarjeta Arduino Mega, la cual a su vez envía señales PWM a los propulsores del miniROV y la plataforma para el movimiento. Si en caso no se envía ninguna señal PWM, no habrá ningún movimiento de parte de los actuadores, cabe resaltar que el movimiento de los actuadores del miniROV y de la plataforma se ejecuta en forma paralela.



Figura 2. 40: Desplazamiento miniROV
Fuente: Elaboración propia

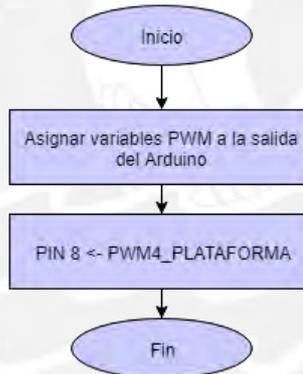


Figura 2. 41: Enrollar/Desenrollar cable umbilical
Fuente: Elaboración propia.

La tarjeta Arduino Mega se encarga de recolectar información del transductor USBL, la sonda multiparamétrica y el sensor inercial a través de sus puertos seriales y pines I2C. Toda la información es enviada al Raspberry Pi 3 mediante el puerto serial 0. Si es que alguno de los componentes mencionados transmite información a diferente frecuencia, la menor de estas frecuencias es la que definirá cuantas veces por segundo se transmite la cadena con la información recolectada al Raspberry.

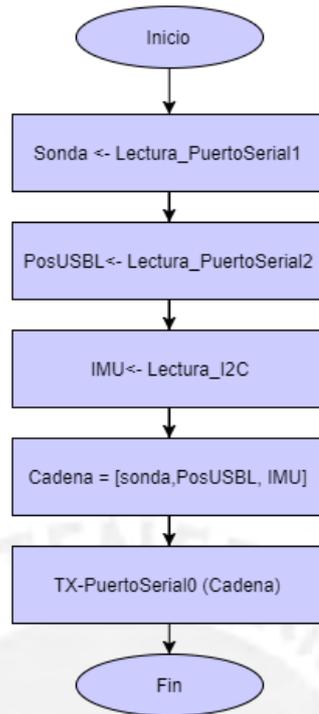


Figura 2. 42: Diagrama de flujo de lectura de sensores
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el Raspberry recolecta la información obtenida de la cámara a la data recibida del Arduino Mega. Toda esta información se envía al CPE510 a través del puerto TCP/IP quien se encarga de comunicar inalámbricamente el sistema.

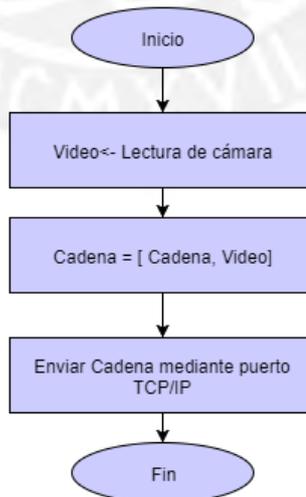


Figura 2. 43: Diagrama de flujo del envío de información
Fuente: Elaboración propia

2.7 Simulaciones

Para conocer que fuerzas actúan en el miniROV durante su desplazamiento sobre el agua se realizaron algunas simulaciones usando la herramienta de Computational Fluid Dynamics usando el software Ansys. Con esta herramienta se puede saber cómo será la distribución de la presión del agua durante el funcionamiento del sistema diseñado.

Primero es necesario simplificar la geometría del miniROV con el propósito de poder simular de manera más eficiente sin consumir demasiado tiempo. En la Figura 2.44 se muestra el modelo simplificado que se usó para las simulaciones presentadas en este capítulo.

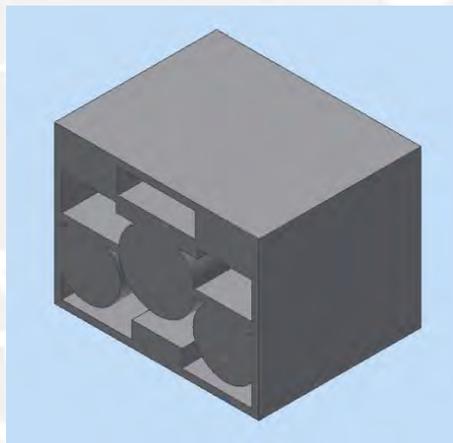


Figura 2. 44: Modelo simplificado del miniROV para simulación.
Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se modela un volumen de control, en este caso se quiere simular las fuerzas que actúan sobre el miniROV cuando se desplaza a su máxima velocidad (1.5 m/s) y trabaja a su máxima profundidad (10 m). Por tal motivo, el volumen de control será la columna de agua de 10 m de altura mostrada en la Figura 2.45.

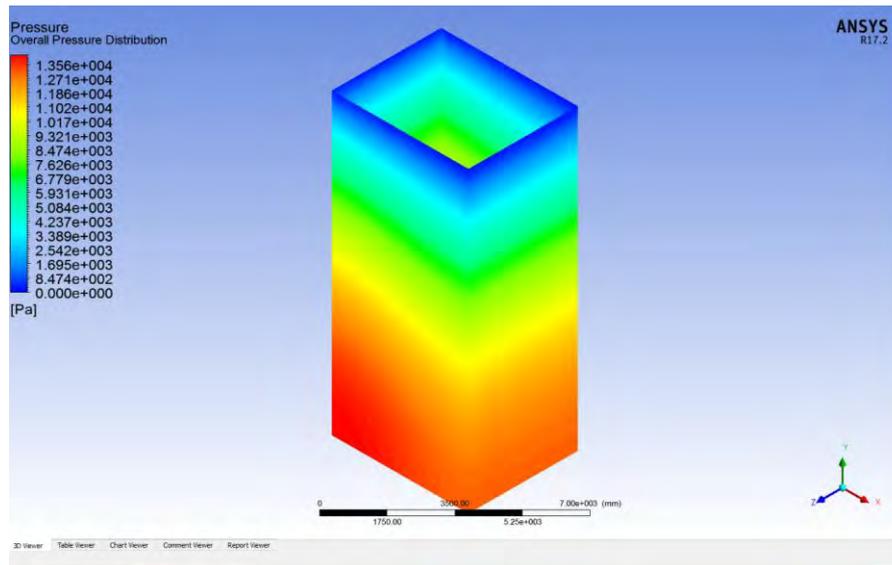


Figura 2.45: Volumen de control
Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la imagen, sobre la superficie superior de la columna de agua la presión relativa es de 0 Pa y va aumentando conforme aumenta la profundidad del agua. Cabe resaltar que si se quiere hallar la presión absoluta se tendrá que sumar la presión atmosférica (101 325 Pa). Luego se introduce al miniROV en movimiento a la simulación y se obtiene la distribución de presión sobre el mismo, en la Figura 2.46 se puede observar que la parte que sufre mayor presión cuando el vehículo submarino avanza a su máxima velocidad es la delantera. La mayor presión ejercida sobre el miniROV es de 14 020 Pa.

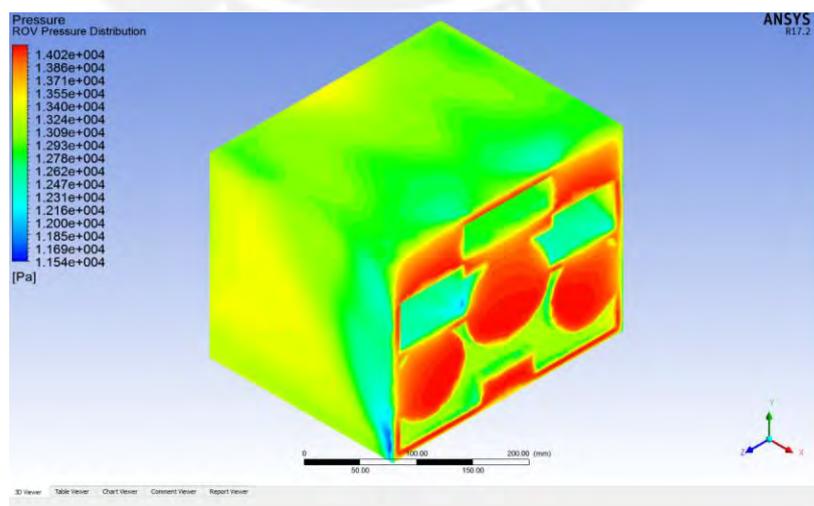


Figura 2.46: Distribución de la presión sobre el miniROV.
Fuente: Elaboración propia.

Usando la simulación como referencia, se puede saber si el miniROV va a resistir trabajar a 10m de profundidad con una velocidad de 1.5 m/s. El material del que está hecho el marco soporta hasta 21 MPa de presión como máximo. Por lo tanto, resistirá sin problemas una presión de 14 020 Pa. Si es que ocurriese algún incidente que hunda al vehículo a mayor profundidad, aguantaría hasta 350 m con un factor de seguridad de 5.



CAPÍTULO 3

PLANOS Y COSTOS

En este capítulo se enlistan los planos de despiece y ensamble del miniROV y la plataforma diseñados, los cuales se encuentran en los anexos. En la Tabla 3.1 se muestran la relación de los planos correspondientes.

Por otro lado, este capítulo también aborda el tema de los costos de elaborar el prototipo. Al cotizar los costos de compra y fabricación se puede conocer cuánto se tiene que invertir para implementar el sistema diseñado. Y de esa manera se puede comparar con alternativas ya existentes, en este caso se podría comparar con el precio de miniROVs de monitoreo comerciales debido a las características de dimensiones, peso y consumo de energía que posee el diseño. Cabe resaltar, que a diferencia de los ROV ofrecidos por empresas como VideoRay, Blue Robotics o Deep Trecker, el diseño propuesto tiene la capacidad de medir ciertos parámetros del agua por lo que el costo en la parte electrónica es mucho más elevado que en la parte mecánica. Otro detalle a tener en cuenta que los precios de los componentes pueden variar dependiendo de la disponibilidad en el mercado, el costo de envío o el tipo de cambio.

3.1 Relación de planos

Tabla3. 1: Lista de planos del sistema.

Fuente: Elaboración propia

Número	Descripción	Tamaño
1	MiniROV submarino	A2
2	Plataforma de acople	A2
3	Plataforma superficie	A2
4	Soporte emisor	A3
5	Soporte inferior trimeter	A4
6	Soporte superior trimeter	A4
7	Soporte linterna	A4
8	Tapa horizontal inferior	A3
9	Tapa horizontal intermedia	A3
10	Tapa horizontal superior	A3
11	Tapa lateral derecha	A3
12	Tapa lateral izquierda	A3

3.2 Costo del sistema mecánico

De acuerdo a lo mostrado en 2.3 Sistema mecánico la totalidad del marco del miniROV está hecho de planchas de HDPE de 10 mm de espesor. Mientras que la base de la plataforma es de una plancha de HDPE de 20 mm de espesor. En la Tabla 3.2 se detalla el costo de fabricación de los elementos mecánicos.

Tabla3. 2: Costo de fabricación de componentes mecánicos.

Fuente: Elaboración propia

Componente	Cantidad	Descripción	Precio (S/.) por unidad	Precio Total
Placas de HDPE de 10 mm	5	300 x 300 mm	86.29	431.46
Placa de HDPE de 20 mm	1	400 x 400 mm	185	185
Cascos de plataforma	2	Fibra de vidrio	1120	2240
Soportes para sonda y recipiente de sistema electrónico	4	Impresión de piezas usando filamento de HDPE	50	200
Flotadores	4	Espuma de poliuretano de 50 x39.5x84	10	40
			Total	3096.46

Por otro lado, ciertos elementos mecánicos no serán fabricados, sino que se comprará en el mercado local. En la Tabla 3.3 se detallan dichos componentes y sus costos.

Tabla3. 3: Costo de adquisición de componentes mecánicos.

Fuente: Elaboración propia.

Componente	Cantidad	Descripción	Compañía	Precio (S/.) por unidad	Precio Total
Pernos M3, M4, M5	-	Acero	-	-	200
Tuercas M3, M4, M5	-	Acero	-	-	85
Arandelas	-	Acero	-	-	45
Caja de ABS	1	Protección de baterías en la plataforma	Polycase	133.22	133.22
Soporte para gancho de remolque	1	Aluminio anodizado	CargaFácil	99.60	99.60
Recipiente de protección de sistema electrónico del miniROV	1	Recipiente de acrílico de 3"	BlueRobotics	329.82	329.82
				Total	892.64

3.3 Costo del sistema electrónico

En la Tabla 3.4 se detalla la lista de componentes electrónicos necesarios para la implementación del sistema, así como la cantidad y precio de cada componente-

Tabla3. 4: Costo de componentes electrónicos.

Fuente: Elaboración propia.

Componentes	Cantidad	Descripción	Compañía	Precio (S/.) por unidad	Precio total
Raspberry Pi 3	1	Sistema embebido	Creatividad Ahora	189	189
Arduino Mega	1	Microcontrolador	Creatividad Ahora	175	175
Basic 30A ESC	3	Controlador de propulsores de miniROV	Blue Robotics	80.84	242.51
IMU ADIS16334	1	Sensor Inercial	DigiKey	1730	1730
Sensor de corriente y voltaje	1	Módulo para medir la corriente y voltaje	Creatividad Ahora	11	11
Trimeter	1	Sonda multiparámetro	Eureka	3500	3 500
Thruster T100	3	Propulsores del miniROV	Blue Robotics	384.79	1154.37
Cabrestante de 12VDC	1	Cabrestante montado en la plataforma	Ali Express	555.14	555.14
Lumen Subsea Light	2	Linternas LED	Blue Robotics	320.12	640.23
Receptor CPE510	2	Dispositivo para comunicación inalámbrica	Memory Kings	164.50	329
Baterías Lipo 14.8 V 8000mAh	3	Baterías	Ebay	219.72	878.87
Fathom X Tether Interface Board	2	Cable umbilical	Blue Robotics	514.13	1028.26
Raspberry Pi Camera V.2	1	Cámara	Creatividad Ahora	139	139
				Total	10,572.39

3.4 Costo total

Finalmente, se muestra el presupuesto total requerido para la implementación del equipo. En este monto no está incluido el costo de mano de obra ni el costo de programación de programación.

Tabla3. 5: Costo total del sistema

Fuente: Elaboración propia.

Componentes	Subtotal (S/.)
Costo de fabricación de componentes mecánicos	3096.46
Costo de adquisición de componentes mecánicos	892.64
Costo de componentes electrónicos	10,572.38
Total	14,561.48



CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Mediante las simulaciones se comprobó que el marco del miniROV es capaz de aguantar la presión ejercida por el agua a una profundidad de 10 m mientras se desplaza a 1.5 m/s.
- Se realizó el diseño preliminar de un sistema mecatrónico capaz de realizar el monitoreo de los siguientes parámetros de agua: profundidad, pH, temperatura y conductividad. Además de permitir la inspección visual de aguas poco profundas con una resolución de cámara de 8 MP.
- El sistema propuesto puede ser controlado por una persona, al pesar menos de 25 kg puede ser cargado por una persona adulta. Además, el sistema diseñado permitiría minimizar el impacto sobre los seres vivos que habitan el área a analizar debido a sus dimensiones. El tamaño de la plataforma es menor a 540 x 395 x 602 mm mientras que el miniROV tiene un tamaño aproximado de 330 x 292 x 255 mm.
- El miniROV podría ser operado de forma remota (hasta 200m de distancia), por lo que en algunos casos no es necesario que la persona que lo controla se exponga a ninguna situación que pueda perjudicarlo físicamente.

- Se usaron componentes con protección IP67 o superior, además de recipientes que protegen a los componentes electrónicos del agua por lo que se minimiza el riesgo de algún cortocircuito causado por el contacto con el agua. En caso se presenten lloviznas, el sistema debería funcionar sin problemas.
- Si es que ocurre algún problema con la alimentación eléctrica y se pierde el control del miniROV, este tendería a flotar debido a su característica de flotabilidad positiva ($> 4.412 \text{ N}$) con el que ha sido diseñado. Por lo que no hay riesgo de que el equipo se hunda y no pueda ser recuperado.
- El costo total del sistema es de 14,561.48 soles, comparándolo con otros ROVs ofrecidos por diferentes compañías como por ejemplo el DTG2 Starter de Deep Trekker que cuesta S/.15 820 y el BlueROV de Blue Robotics cuyo valor es de S/. 11 308 se concluye que el sistema diseñado tiene un valor aceptable. Se debe tener en cuenta que, aunque la profundidad de trabajo es de solo 15 m, el miniROV diseñado puede medir los parámetros del agua a diferencia de los otros ROVs mencionados que solo realizan inspección por video.

4.2 Recomendaciones

- Incluir al menos una cámara más en el diseño permitiría obtener más información acerca de lo que sucede debajo del agua, aunque esto signifique tener que implementar más linternas LED.
- Se podría montar una antena GPS y una ecosonda a la plataforma de manera que sea capaz de realizar batimetría, complementando la labor del miniROV. De esa manera se puede aplicar un monitoreo más completo a los cuerpos de agua. Ambos componentes mencionados son ligeros por lo que su peso no afectaría en gran medida el diseño de la plataforma y su consumo no sobrepasa los 200 mA.

- Se requiere realizar pruebas con el sistema implementado para comprobar que funcione de acuerdo a los requerimientos mencionados en la presente tesis.



Referencias

- [1] Organización Mundial de la Salud (OMS), “Progress on Sanitation and Drinking Water – 2015 update and MDG assessment”, Ginebra, Suiza.p.90,2015.
- [2] Ministerio del Ambiente (MINAM), “Estudio de desempeño ambiental”, San Isidro, Lima, p.716, 2015.
- [3] Autoridad Nacional del Agua (ANA), “Inventario nacional de glaciares y lagunas”, San Isidro, Lima, p.44, 2014.
- [4] Autoridad Nacional del Agua (ANA), “Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales”, San Isidro, Lima, p.92, 2016.
- [5] Ministry of Education of Peru official Website, 2013 [Online]. Available:<http://www.minedu.gob.pe/normatividad/reglamentos/ROFHuascaran.php/>
- [6] Comisión Ambiental Municipal de Jauja, “Plan de acción para la conservación de la laguna de Paca”, Jauja , p.6, 2012.
- [7] Organización Mundial de la Salud (OMS), “Exposición al arsénico en el agua potable: una gran amenaza inadvertida para la salud en Perú”,2014 [Online]. Available: <http://www.who.int/bulletin/volumes/92/8/13-128496-ab/es/>
- [8] Q. Xiaowei, and Z. Aiping,”The simulation for Autonomous Navigation of water-jet-propelled Unmanned Surface Vehicle”, pp.945-948, 2011.
- [9] L.H.Taylor, “Drone vessel for an ROV”, U.S.Patent 6 349 558, Feb. 26,2002.
- [10] J.R. McDermott, “Remote ROV launch and recovery apparatus”, U.S.Patent 1 031 506, May. 6,2002.
- [11] P.A. Robert, “Multi-ROV delivery system and method”, U.S. Patent 6 260 504, Jul. 17, 2001.
- [12] J. E. Refsnes and A. J. Sorensen, “Design of control system of torpedo shaped ROV with experimental results”, pp. 264-270, 2004.
- [13] I. C. Rust and H. H. Asada, “The Eyeball ROV: Design and Control of a Spherical Underwater Vehicle Steered by an Internal Eccentric Mass”, pp. 5855-5862, 2011.
- [14] T. Jimenez, J. L. Gonzalez, L. F. Martinez, E. Olguin, P. A. Resendiz and M. Bandala, “Deep water ROV design for the Mexican oil industry”, 2010.
- [15] G. W. Jenq-Neng and K.W. Cutter, “Closed-Loop Tracking-by-Detection for ROV-Based Multiple Fish Tracking” pp.7-12, 2016.
- [16] K. Poore, G. Wheat and W. Kirkwood, “A Small Scale ROV for Shallow-Water Science Operations”, 2016.

- [17] D. R. Pinkard, D. M. Kocak and J. L. Butler, "Use of a Video and Laser System to Quantify Transect Area for Remotely Operated Vehicle (ROV) Rockfish and Abalone Surveys", p1-6, 2012.
- [18] N. Sakagami, F. Takemaru, R. Ono, C. Katagiri, Y. Nakanishi and Y. Yakamoto, "Observation Support System of an ROV for Underwater Archaeology", p. 192-196, 2015.
- [19] D. R. Edgington, D. E. Cline, D. Davis, I. Kerkez and J. Mariette, "Detecting, Tracking and Classifying Animals in Underwater Video", 2006.
- [20] A. Sedlazeck, K. Köser, and R. Koch, "3D Reconstruction Based on Underwater Video from ROV Kiel 6000 Considering Underwater Imaging Conditions", 2009.
- [21] B. M. Nowak, T. Whitney and S.F. Ackley, "Analysis of ROV Video Imagery for Krill Identification and Counting under Antarctic Sea Ice", 2008.
- [22] M. Morgado, P. Oliveira, C. Silvestre y J. Vasconcelos, "USBL/INS Tightly-Coupled Integration Technique for Underwater Vehicles," Information Fusion, 2006 9th International Conference on, pp. 1-8, 10-13 July 2006.
- [23] Y. Watanabe, H. Ochi y T. Shimura, "The SSBL Positioning for The AUV with Data Transmission," OCEANS 2007, pp. 1-7, Sept. 29 2007-Oct. 4 2007.
- [24] Z. Yuyi, G. Zhenbang, W. Lei, Z. Ruiyong y L. Huanxin, "Study of Underwater Positioning Based on Short Baseline Sonar System," Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2009. AICI '09. International Conference on, vol. 2, pp. 343-346, 7-8 Nov. 2009.
- [25] S. Smith and D. Kronen, "Experimental results of an inexpensive short baseline acoustic positioning system for AUV navigation," OCEANS '97. MTS/IEEE Conference Proceedings, vol. 1, pp. 714-720, 6-9 Oct 1997.
- [26] Y. Chen, D. Zheng, P. Miller and J. Farrell, "Underwater inertial navigation with long base line transceivers: A Near-Real-Time approach," Decision and Control (CDC), 2013 IEEE 52nd Annual Conference on , pp. 5042 - 5047, 10-13 Dec. 2013.
- [27] M. V. Jakuba, C. N. Roman, H. Singh, C. Murphy, C. Kunz, C. Willi, T. Sato and R. A. Sohn, "Long-baseline acoustic navigation for under-ice autonomous underwater vehicle operations," J. Field Robot, vol. 25, pp. 11-12, November 2008.
- [28] X. Lurton and N. Millard, "The feasibility of a very-long baseline acoustic positioning system for AUVs," OCEANS '94. 'Oceans Engineering for Today's

Technology and Tomorrow's Preservation.' Proceedings, vol. 3, pp. 403-408, 13-16 Sep 1994.

- [29] J. Jansch and H. Birkhofer, “The Development of the guideline VDI 2221-The change of direction”, 2006.
- [30] Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), “Plan Nacional de Atribución de Frecuencias”, Lima, pag70, 2008.
- [31] R. D. Christ and R. L. Wernli, “The ROV manual, A user guide for remotely operated vehicles”, 2da Edición, 2013.
- [32] K. J. Rawson y E. C. Tupper, “Basic Ship Theory”, 5ta Edición, Oxford: Butterworth Heinemann, 2001.

