

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Facultad de Ciencias e Ingeniería



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**DISEÑO DE UN USV PARA EL MONITOREO DE CALIDAD DE
AGUA Y TOMA DE MUESTRAS EN LAGOS**

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

José Guillermo Balbuena Galván

ASESOR: MSc. Francisco Fabián Cuellar Córdova

Lima, Noviembre del 2017

RESUMEN

El presente trabajo consiste en el desarrollo del diseño de un USV (Unmanned Surface Vehicle), en español vehículo de superficie no tripulado, el cual debe ser capaz de monitorear la calidad de agua y recolectar muestras representativas de agua de los lagos. La problemática que incentivo este trabajo es la necesidad de un control de calidad de agua sencillo y rápido, que pueda ser realizado por una persona en un área amplia y en menor tiempo, con el objetivo de mejorar la gestión de los recursos hídricos (lagos). El USV es operado de manera remota (red de área local) por un operario que lo posicionara en el punto deseado de recolección; el proceso de recolección de muestras se realiza de manera automática mediante el uso de un cabestrante eléctrico y un sensor de profundidad para conocer la posición a la que se encuentra el sistema de recolección.

El trabajo realizado comprende el diseño de la embarcación y el sistema recolector haciendo uso de los fundamentos mecánicos necesarios, asimismo la selección de los componentes electrónicos para la localización, direccionamiento, comunicación y alimentación del sistema. Como resultado del trabajo realizado se concluyó que el diseño es virtualmente realizable y que el costo total del diseño propuesto es menor que el costo total de la adaptación de un USV comercial.

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR
EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

Título : Diseño de un USV para el monitoreo de calidad de agua y toma de muestras en lagos.
Asesor : MSc. Francisco Fabián Cuellar Córdova.
Alumno : José Guillermo Balbuena Galván
Código : 20112077
Tema N° : # 175
Fecha : 22 de noviembre del 2016



Descripción y Objetivos

Descripción:

En la tesis se desarrollará el diseño de un USV (Unmanned Surface Vehicle), para poder monitorear la calidad de agua en los lagos, asimismo este vehículo tendrá la capacidad de poder recolectar muestras de aguas a diferentes profundidades. La finalidad de este USV es mejorar los métodos actuales del control de la calidad de los recursos hídricos, en este caso el lago, llegando a tener un monitoreo más frecuente, sencillo y eficaz.

Objetivos:

- Diseño mecánico del USV y del recolector de muestras para distintas profundidades, este debe poder moverse hasta 1 m/s.
- Diseño del sistema electrónico del USV que permitirá el control remoto del USV a una distancia mínima de 200 m; asimismo asegurar su funcionamiento como mínimo 30 min.
- Diseño electrónico a prueba de agua con factor IP67 según la norma IEC60529.
- Realizar la lógica de control que permita el control de manera remota del USV.






INDICE DE CONTENIDO

	Pág.
INDICE DE CONTENIDO.....	i
INDICE DE TABLAS	iii
INDICE DE FIGURAS.....	v
GLOSARIO DE TERMINOS	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
I. PRESENTACIÓN DE LA TEMATICA.....	2
1.1 Presentación de la problemática.....	2
1.2 Antecedentes	3
1.3 Formulación de la Propuesta.....	7
1.3.1 Objetivos y Requerimientos.....	7
1.4 Metodología	9
II. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DEL USV.....	10
2.1 Presentación de la solución.....	10
2.2 Sistema Mecánico	14
2.2.1 Recolector de muestras	15
2.2.2 Mecanismo de ascenso - descenso	23
2.2.3 Embarcación USV	28
2.2.3.1 Cálculo de los cascos	28
2.2.2 Lista de planos del sistema mecánico.....	37
2.3 Sistema Electrónico	38
2.3.1 Selección de componentes electrónicos.....	50
2.3.1.1 Componentes de comunicación.....	50
2.3.1.1 Componentes del USV.....	53
2.3.1.2 Componentes del Recolector de muestras	62
2.3.2 Alimentación del Sistema	65
2.4 Sistema de Control	70
III. COSTOS DE LA SOLUCIÓN	75
3.1 Costos de los componentes electrónicos	75
3.2 Costos de los componentes mecánicos.....	77
3.3 Costos totales	78
3.4 Costos adaptación.....	78
CONCLUSIONES.....	79

RECOMENDACIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	81



INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Principales características de los ASV desarrollados de trabajos de investigación.....	5
Tabla 1.2. Principales características de los ASV comerciales.....	6
Tabla 1.3. Rango y precisión mínimos requeridos de los sensores.....	8
Tabla 2.1. Propiedades del Polietileno de Alta Densidad (HDPE).....	17
Tabla 2.2. Propiedades del Acero ASTM A-500.....	23
Tabla 2.3. Características Polea 03 180.....	26
Tabla 2.4. Características GX1.....	26
Tabla 2.5. Propiedades de la fibra de vidrio clase E.....	28
Tabla 2.6. Lista de planos.....	37
Tabla 2.7. Tabla de comparación de routers y estaciones base.....	51
Tabla 2.8. Características de los componentes adicionales al WBS510.....	52
Tabla 2.9. Principales características de los propulsores analizados.....	55
Tabla 2.10. Características Phoenix EDGE HV60.....	56
Tabla 2.11. Características de los controladores de motor DC.....	57
Tabla 2.12. Principales características de los magnetómetros analizados.....	58
Tabla 2.13. Principales características de las cámaras analizadas.....	59
Tabla 2.14. Principales características de los GPS analizados.....	60
Tabla 2.15. Principales características de los embebidos analizados.....	61
Tabla 2.16. Principales características de los motores a pasos analizados.....	62
Tabla 2.17. Principales características de los motores a pasos analizados.....	62
Tabla 2.18. Características Controlador EZ17.....	63
Tabla 2.19. Principales características de las sondas multiparametro analizados.....	64

Tabla 2.20. Características mínimas de las baterías del sistema.	66
Tabla 2.21. Características LiPo 4S Turnigy.	67
Tabla 2.22. Características del regulador D24V50F5.....	67
Tabla 2.23. Características LiPo 6S Turnigy.	69
Tabla 3.1. Costos de componentes electrónicos.....	76
Tabla 3.2. Costos componentes mecánicos.....	77
Tabla 3.2. Costos totales.	78
Tabla 3.2. Costos de adaptación.	78



INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Vista Isométrica del USV.....	11
Figura 2.2. Vistas principales del USV.....	12
Figura 2.3. Diagrama de bloques de funcionamiento.....	13
Figura 2.4. Subsistemas y dimensiones del USV. 1) Recolector de muestras. 2) Mecanismo de ascenso y descenso. 3) Embarcación USV.....	14
Figura 2.5. Partes del recolector de muestras. 1) Botella Niskin. 2) Mecanismo de activación. 3) Rack.	15
Figura 2.6. Piezas hexagonales que conforman el rack.	16
Figura 2.7. Soporte vertical del rack.....	16
Figura 2.8. Agarradera de las botellas Niskin.	17
Figura 2.9. Conexiones de las uniones de las agarraderas para las botellas Niskin. ...	18
Figura 2.10. Agarradera de la sonda multiparámetro.	19
Figura 2.11. Sujeción de la sonda en el rack.....	19
Figura 2.12. Sistema de liberación o activación de recolección de las botellas Niskin. 1) Eje. 2) Resorte. 3) Estructura. 4) Eslabón.....	20
Figura 2.13. Eje del mecanismo de liberación.	20
Figura 2.14. Posición inicial de trabajo de mecanismo de liberación.	21
Figura 2.15. Posición final de trabajo de mecanismo de liberación.....	21
Figura 2.16. Método de aprisionamiento del resorte en el mecanismo de liberación.....	22
Figura 2.17. Agujero final para el encaje del eje.....	22
Figura 2.18. Mecanismo Ascenso- Descenso 1) Soporte. 2) Cáncamo. 3) Polea. 4) Cabestrante.	23
Figura 2.19. Estructura de soporte.....	24
Figura 2.20. Soldadura entre la plancha inferior y el tubo de soporte.....	24
Figura 2.21. Soldadura en la plancha superior de unión entre los soportes y el tubo central.....	24

Figura 2.22. Conexión entre el cáncamo y el tubo cuadrado central de la estructura.	25
Figura 2.23. Polea 03 180.	26
Figura 2.24. Cabestrante GX1.	27
Figura 2.25. Conexión del Cabestrante al soporte posterior.	27
Figura 2.26. Dimensiones de un catamarán. (a) Vista de perfil. (b) Vista frontal. (c) Vista frontal.	29
Figura 2.27. Valores del coeficiente de área media según la forma de los cascos.	30
Figura 2.28. Visualización de los coeficientes. (a) C_W . (b) C_M . (c) C_B . (d) C_P	31
Figura 2.29. Casco del USV.	34
Figura 2.30. Tapa en el casco del USV.	34
Figura 2.31. Detalle de la incrustación de tuercas en el USV.	35
Figura 2.32. Incrustación del sujetador en el USV.	35
Figura 2.33. Disposición de los sujetadores en el USV.	35
Figura 2.34. Detalle de los canales para los O-ring en la unión del soporte.	36
Figura 2.35. Detalles del soporte del propulsor.	36
Figura 2.36. Conexión del soporte del propulsor.	36
Figura 2.37. Diagrama de bloques del sistema electrónico.	39
Figura 2.38. Esquemático de la tarjeta de alimentación.	40
Figura 2.39. Borneras para la batería y la salida de la tarjeta de alimentación.	41
Figura 2.40. Borneras para la batería y la salida de la tarjeta de alimentación.	41
Figura 2.41. Esquemático de la tarjeta en la superficie.	42
Figura 2.42. Borneras para la batería LiPo 4S.	43
Figura 2.43. Borneras para la comunicación RS-485.	43
Figura 2.44. Conexiones del convertor múltiple.	43
Figura 2.45. Conexiones de las salidas PWM.	44
Figura 2.46. Conexiones del Raspberry Pi 3.	44

Figura 2.47. Conexiones del conversor de 5 VDC	45
Figura 2.48. Conexiones del módulo GPS.....	45
Figura 2.49. Conexiones del magnetómetro.....	45
Figura 2.50. Esquemático de la tarjeta en el recolector.	46
Figura 2.51. Conexión de la batería de 24 VDC mediante borneras.	47
Figura 2.52. Conexión en el conversor del recolector.	47
Figura 2.53. Borneras para la conexión de la salida del HUB RS-485.....	48
Figura 2.54. Conexiones del regulador de 12 VDC.....	48
Figura 2.55. Conexiones del controlador del motor a pasos.	49
Figura 2.56. Conexiones del regulador de 5 VDC.	49
Figura 2.57. Clasificación de las redes inalámbricas.....	50
Figura 2.58. Diagrama de cuerpo libre (DCL) del USV.....	53
Figura 2.59. Gráfica Velocidad vs. Resistencia del Agua.....	54
Figura 2.60. Gráfica Velocidad vs. Resistencia del Agua.....	54
Figura 2.61. Phoenix EDGE HV60.	56
Figura 2.62. Controlador EZ17.	63
Figura 2.63. Gráfica Torque – Velocidad del motor a pasos WP-U21.....	66
Figura 2.64. LiPo 4S Turnigy.....	67
Figura 2.65. Curvas de eficiencia del regulador D24V50F5.	68
Figura 2.66. Regulador Step-down D24V50F5.....	68
Figura 2.67. LiPo 6S Turnigy.....	69
Figura 2.68. Diagrama de Flujo del programa principal.....	71
Figura 2.69. Diagrama de Flujo de la configuración inicial.	71
Figura 2.70. Diagrama de Flujo de la recepción de comandos.	72
Figura 2.71. Diagrama de Flujo del movimiento de propulsores.....	72
Figura 2.72. Diagrama de Flujo del movimiento de propulsores.....	73

Figura 2.73. Diagrama de Flujo del movimiento de propulsores73

Figura 2.74. Diagrama de Flujo el movimiento del recolector74



GLOSARIO DE TERMINOS

USV	: Unmanned Surface Vehicle
ROV	: Remotely Operated Vehicle
ESC	: Electronic Speed Controller
PWM	: Pulse Wide Modulation
WPAN	: Wireless Personal Area Network
WLAN	: Wireless Local Area Network
WWAN	: Wireless Width Area Network
GPS	: Global Positioning System
USB	: Universal Serial Bus
HDPE	: High Density Polyethylene
POE	: Power over Ethernet
PtP	: Point to Point
PtMP	: Point to Multi Point
ANA	: Autoridad Nacional del Agua
DGCRH	: Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la gestión de los recursos hídricos ha cobrado gran importancia a nivel nacional, la creación de diferentes entidades encargadas como la ANA y la DGCRH son muestras de estos; teniendo en cuenta el contexto nacional se decidió la realización del presente trabajo. El objetivo principal de este trabajo es el diseño de un sistema que pueda ser capaz de mejorar los procedimientos de control de calidad de agua de los lagos, buscando volverlos sencillos y rápidos. En los siguientes capítulos el lector podrá encontrar la descripción del sistema desarrollado para cumplir el objetivo propuesto; asimismo se explicaran los detalles del diseño mecánico, las características de los componentes electrónicos y la estrategia de control que permitirá el correcto funcionamiento del todo el sistema. Por último, como parte del proceso de diseño se realiza un estimado del costo total y se compara con los precios comerciales de sistemas existentes con su respectiva adaptación, buscando analizar la viabilidad de la implementación de la solución propuesta.

CAPÍTULO 1

PRESENTACIÓN DE LA TEMÁTICA

En este capítulo se explicara en términos generales la problemática que llevaron al desarrollo del sistema propuesto, así mismo se describirá los avances que hay a nivel mundial en la tecnología que se desea desarrollar. Con estos puntos definidos se determinaran los requerimientos del sistema y el plan de trabajo con el cual se desarrolló el presente trabajo.

1.1 Presentación de la problemática

En los últimos años en el Perú instituciones como la Autoridad Nacional del Agua (ANA) mediante la Dirección de Gestión de Recursos Hídricos (DGCRH) están en busca de mejorar los estándares de calidad de agua. La calidad de agua en los últimos años ha venido deteriorándose principalmente debido al deficiente método de monitoreo de calidad de agua que se emplea actualmente. Este método es realizado manualmente y si la muestra es en medio de un lago se necesita el uso de una embarcación para llegar al punto de recolección [1].

Entre los factores que influyen en la calidad del agua el ANA los clasifica en [2]: antropogénicos, que son los relacionados a las actividades productivas (minería, agricultura, etc.); y naturales, que son los factores en los que no interviene el hombre. Las principales causas antropogénicas son: el vertimiento de afluentes del sector minero (agua con metales pesados) y agrícola (agua con agroquímicos). Por ejemplo

se han encontrado niveles de concentración de arsénico entre 14.6-42.5 $\mu\text{g/l}$ en el río Rímac [3] cuando lo permitido es 10 $\mu\text{g/l}$; además de esto la concentración de plomo en este río es de 0.037 mg/l [4] cuando el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAN [5] indica que el máximo es de 0.01 mg/l.

Las causas de que estos factores antes mencionados sigan afectando es que el método de recolección de muestras y monitoreo de parámetros es complicado y lento, lo que impide que pueda realizarse frecuentemente o en caso se puedan realizar de manera frecuente solo se puede inspeccionar en las orillas en donde un operario toma las muestras. Otra causa adicional es la falta de participación en el cuidado de la calidad de agua de las comunidades aledañas al lago o río.

Las consecuencias directas de contar con deficientes métodos de monitoreo son el aumento de enfermedades debido al incremento de bacterias o metales pesados en el agua. Entre las enfermedades causadas por este motivo se encuentran la arsenicosis, la diarrea, el envenenamiento por plomo, entre otras, la OMS reconoce que estas están estrechamente relacionadas con la calidad del agua [6]. En el Perú hasta la semana 32 del presente año se han presentado 738 804 casos de diarrea, donde la mayor tasa se da en Moquegua [7]. Adicionalmente, la generación conflictos sociales de diferentes índoles, por ejemplo solo la minería se lleva el 37.2% del total de conflictos actuales [8] y la mayoría debido a la posible contaminación que generaría esta actividad.

1.2 Antecedentes

En los últimos años el creciente interés en los temas relacionados a la contaminación de las aguas, ha llevado a los investigadores a desarrollar nuevos métodos de monitoreo y estudio de los diferentes recursos hídricos donde la intervención humana sea nula o reducida. Como resultado, se han implementado variedad de vehículos acuáticos como los ASV (Autonomous Surface Vehicle) o USV (Unmanned Surface Vehicle), AUV (Autonomous Underwater Vehicle), ROV (Remote Operated Vehicle), entre otros. Los ASV son móviles flotantes sin cableado que son capaces de realizar operaciones complejas sin la interacción humana [9], esto no impide que algunos tengan la capacidad de ser operados remotamente [10]. Los ROV son vehículos

acuáticos que tienen un cable de alimentación y es operado desde una embarcación, en cambio el AUV tiene alimentación propia y su desplazamiento es autónomo [11].

Debido a la característica del ASV mencionada, le es posible completar trabajos (tanto científicos como militares) que pueden resultar complejos o incluso peligrosos para los seres humanos (misiones de rescate e infiltración o adquisición de datos) [12]. Son muchos los avances en este campo; por ejemplo se ha realizado mapeos 3D de una ciudad sumergida con un USV y técnicas de procesamiento de imágenes [13], también han sido usados como una estación de comunicación intermedia entre vehículos aéreos y submarinos como es el caso del SWORDFISH [14]. Cumpliendo una tarea similar a la última mencionada, se ha usado para localizar con mayor precisión un AUV, debido a que los GPS no funcionan debajo del agua [15]; precisión necesaria para la búsqueda de bombas enterradas bajo el mar [16].

Adicionalmente, los USV están siendo ampliamente desarrollados tanto para el cuidado del agua (monitoreo de parámetros acuáticos o adquirir muestras de agua) como para enfrentar posibles desastres ambientales (como derramamiento de petróleo). Como ejemplo, al OASIS un vehículo diseñado para el monitoreo de parámetros tanto aéreos como acuáticos y siendo energizado con energía solar [17]. También, se tiene al USV desarrollado por “Universidad Marina de Shanghai” que se diseñó para que pueda aceptar múltiples sensores de medición ambiental [18]. Para la toma de muestras a distintas profundidades se ha usado un AUV comunicado con un ASV [19] o el HydroNet que permite tomar muestras hasta profundidades hasta 50 m [20], [21]. En el caso de desastres ecológicos se ha usado AMSV's (Autonomous Marine Surface Vehicles) para el confinamiento de petróleo, estos rodean la zona afectada e impiden el avance del petróleo [22].

En el desarrollo de los USV es de suma importancia tener un buen manejo y control, así como contar con los sensores adecuados. Es por este motivo que muchas de las investigaciones se enfocan en mejorar la navegación. Como ejemplo, tenemos el uso de algoritmos PID junto a lógica-difusa para la navegación y evasión de obstáculos [23]; el uso de controladores en el espacio de estados para mantener la dirección del USV, mantenerlo en una posición fija o el seguimiento de caminos [24].

Adicionalmente, se tiene el UCAP (Unmanned Capsule) que usa un control en cascada para dirigirse a sus objetivos [25]. Para su localización se usa comúnmente los siguientes sensores: GPS, IMU (Inertial Measurement Unit), magnetómetros o compases, entre otros. Asimismo, la comunicación en tiempo real para la observación de los datos también es importante y generalmente se han usado radio frecuencia, Wi-fi y módems acústicos [9], [12], [14].

Otra característica importante en los ASV es el tiempo de autonomía, entre las mayores duraciones encontradas tenemos el MAINAMI que puede estar navegando hasta 48 horas [15]. Es por este motivo que también se han realizado investigaciones solo con la finalidad de mejorar el consumo de energía [26]. Un resumen de las principales características de los ASV desarrollados en trabajos de investigación se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Principales características de los ASV desarrollados en trabajos de investigación
Fuente: Propia

Nombre	SWORDFISH	OASIS	HydroNet	UCAP	MAINAMI
Diseño					
Tipo	Catamarán	Mono Hull	Catamarán	Mono Hull	Mono Hull
Dimensiones	4.5x2.2x0.5 m	5.5x1.5x1.8 m	2.0x1.2x0.8 m	1.45x0.5x0.5 m	6.0x2.6x3.2 m
Peso	190 kg	1360.8 kg	82.8kg	25 kg	3000 kg
Carga	No específica	226.8 kg	No específica	20 kg	No específica
Velocidad	1.2 m/s	1.1 - 1.3 m/s	1.0 - 1.5 m/s	1.0 m/s	1.0 - 2.6 m/s
Institución que lo desarrolla	Porto University, Porto Polytechnic Institut	National Oceanic and Atmospheric Administration	European Commission	INESC TEC and University of Porto	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
País	Portugal	Estados Unidos	Italia	Portugal	Japón
Funciones	Estación media para comunicacion	Mediciones de aire y agua	Toma de muestras	Rescate de personas	Localización de un AUV
Duración	6 h @ 1 m/s	No específica	8 h @ 3.6 m/s	No específica	48 h

Finalmente, cabe resaltar que ya existen varias empresas que venden USV de propósito general entre ellas tenemos a “Clearpath Robotics” con el Heron [27], “ASV Unmanned Marine Systems” con el C-Cat 2 [28], “Seafloor” con el Hydrone-RCV [29], “Deep Ocean Engineering” con el USV I-1650 [30], “EvoLogics” con Sonobot [31], entre otras empresas. La mayoría de estas empresas ofrecen los USV para uso libre, el cliente le puede adicionar una carga con lo que necesite, la comparación entre sus características técnicas se muestra en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Principales características de los ASV comerciales
Fuente: Propia

Nombre	Heron	Hydrone ASV	USV I-1650	C-Cat2	SonoBot
Diseño					
Tipo	Catamarán	Catamarán	Mono Hull	Catamarán	Catamarán
Dimensiones	1.4x1.0x0.3 m	1.2x0.7x0.3 m	1.7x0.7x0.4 m	2.4x1.2x0.5 m	1.3x0.9x0.5m
Peso	28 kg	14.9 kg	22 kg	80 kg	30 kg
Carga	10 kg	11.3 kg	20 kg	No especifica	No especifica
Velocidad	1.7 m/s	10 m/s	2.0 - 3.0 m/s	4.6 m/s	1.0 - 3.6 m/s
Empresa	Seafloor	Clearpath Robotics	Deep Ocean Engineering	ASV unmanned manire systems	Evologics
Duración	8 horas	5 - 8 horas	4 horas	6 horas	10 h@ 1.0 m/s
Precio	\$ 30,000.00	\$ 10,000.00	\$ 40,800.00	\$ 102,000.00	\$ 75,000.00

1.3 Formulación de la Propuesta

1.3.1 Objetivos y Requerimientos

El objetivo principal del presente trabajo de tesis es el diseño de un USV, robot acuático de superficie, que permita mejorar el método de monitoreo de calidad de agua. En el monitoreo el robot debe recolectar datos 'in situ' y adquirir muestras representativas a diferentes profundidades para el posterior análisis en laboratorio.

Objetivos Específicos:

- Diseño de un sistema mecánico (embarcación), que garantice la flotabilidad y estabilidad del sistema.
- Diseño de sistema de monitoreo para parámetros de campo de la calidad de agua (pH, Temperatura, conductividad y oxígeno disuelto) y toma de 6 muestras hasta una profundidad de 50 m.
- El robot deberá tener 2 cámaras que se mostrarán a tiempo real para ayudar al operario a direccionar el USV.
- Diseño del sistema de telemetría para el monitoreo de los parámetros de calidad de agua.

Requerimientos:

Requerimientos Mecánicos

- El USV deberá mantener la estabilidad y poder sostener todo el peso del sistema con un adicional de 10 kg.
- El móvil deberá desplazarse como mínimo a una velocidad de 1 m/s.
- El móvil debe ser de como máximo 2.0 m x 2.0 m x 2.0 m de largo, ancho y alto respectivamente. Buscando con esto un tamaño adecuado para el transporte.
- El casco del USV deberá ser de un material anticorrosivo o con protección ante la corrosión para ambientes C5-M (Alta corrosión según norma ISO 12944).

Requerimientos Electrónicos

- Todo el sistema electrónico deberá contar con protección IP67, cumpliendo la norma *IEC60529 Degrees of Protection*.

- El sistema deberá ser alimentados con corriente continua, la cual será suministrada por un conjunto de baterías en donde el voltaje puede estar entre 12 – 24 V cada una con una capacidad de 10000 mAh como máximo.
- Los sensores de medición contarán con los siguientes rangos y precisión que se muestran en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Rango y precisión mínimos requeridos de los sensores
Fuente: Propia

Parámetro	Rango	Und.	Precisión
pH	0 -14	uu	0.1
Temperatura	-5 – 50	°C	0.1
Conductividad	0 – 2000	uS/cm	0.1
Oxígeno Disuelto	0 – 10	mg/L	0.1
Profundidad	0 – 50	m	0.05

- El móvil realizará la toma de 6 muestras en un periodo máximo de 1 hora, tiempo durante el cual debe estar asegurada la duración de la batería. Este tiempo incluye el movimiento del punto inicial al punto de recolección, la toma de las muestras y el retorno al punto inicial.

Requerimientos de Control

- El robot deberá ser operado de manera inalámbrica mediante Wi-fi o radiofrecuencia hasta una distancia de mínima de 200 m.
- La recolección de muestras se realizará de manera automática.
- El sistema contará con una interfaz de usuario en la que podrá visualizarse los parámetros de campo medidos cada segundo (frecuencia de 1 Hz) y el video se mostrará en tiempo real.

1.4 Metodología

El desarrollo de la tesis será basado en la metodología alemana VDI 2221 “Proceso generalizada de desarrollo y diseño de sistemas mecatrónicos”, el cual es un proceso iterativo no secuencial. Como primer punto se tiene que entender el problema y plasmar las necesidades del sistema que se quiere desarrollar; el resultado de esto son los requerimientos que se detallaron con en la sección anterior. Luego de haber comprendido las necesidades del sistema se procede a realizar el proceso de funcionamiento del sistema; como resultado se obtiene una “Estructura de funciones” (Anexo A)

Como tercer paso se realizara la revisión de las opciones que satisfacen las funciones previamente definidas, para facilitar esta tarea se divide en dominios generales (mecánica, electrónica y control) y se realiza una matriz. En cada matriz se plantean opciones generales para cada dominio y a partir de estas se elaboran los conceptos solución. Estos conceptos de solución se evaluarán tanto económicamente como técnicamente y se obtendrá el mejor.

Como paso final del proceso, se comienza el diseño de la solución más adecuada que brinda la evaluación previa, cabe recalcar que este modelo se puede ir modificando y variando si es que durante los cálculos o estrategias de control no se verifica el cumplimiento de las exigencias. Todo este proceso de diseño, selección de los componentes y materiales se detallara en la siguiente sección.

Para poder asegurar el correcto desarrollo de la metodología se seguirá un cronograma de actividades en donde se contemplan todos los pasos del proceso de diseño que anteriormente han sido mencionados.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DEL USV

En la presente sección se presentara el concepto solución que se desarrolló para lograr los objetivos propuestos, monitoreo de calidad de agua y recolección de muestras, que fueron mencionados a detalle en el capítulo anterior. Lo primero que se presentara en este capítulo es la idea general del concepto, luego se explicara a detalle los puntos más importantes del diseño mecánico y electrónico; finalmente se explicara la estrategia de control propuesta para el sistema.

2.1 Presentación de la solución

El sistema desarrollado para cumplir los objetivos es un vehículo de superficie no tripulado (USV por sus siglas en inglés Unmanned Surface Vehicle), el modelo de este vehículo es un catamarán; se escogió porque permite lograr mayor estabilidad y el empuje que puede generar es hasta 2.5 veces el del su equivalente en Mono Hull [32]. El USV deberá con un recolector de muestras que pueda descender y ascender para tomar muestras, para la etapa de recolección se escogieron Botellas Niskin; estos instrumentos de recolección son comerciales y se usan ampliamente en investigaciones científicas [33].

Con estos instrumentos se diseñó un soporte capaz de albergar una mayor cantidad de los mismos, para esto el diseño se inspiró en los distintos arreglos comerciales comúnmente llamados “Niskin Racks”. Para finalizar la descripción mecánica, para el mecanismo de ascenso y descenso se seleccionó un cabestrante eléctrico, que son dispositivos que cuentan con un tambor y un motor que permite enrollar y desenrollar

la cuerda que sujeta el “Rack Niskin”, que a su vez pasa a través de una polea. Es importante recalcar que durante el diseño se tomaron en consideración las posibles filtraciones de agua por los agujeros que se usaron en las uniones. En la Figura 2.1 se puede observar el dibujo isométrico del USV y se pueden ver las partes principales antes mencionadas.

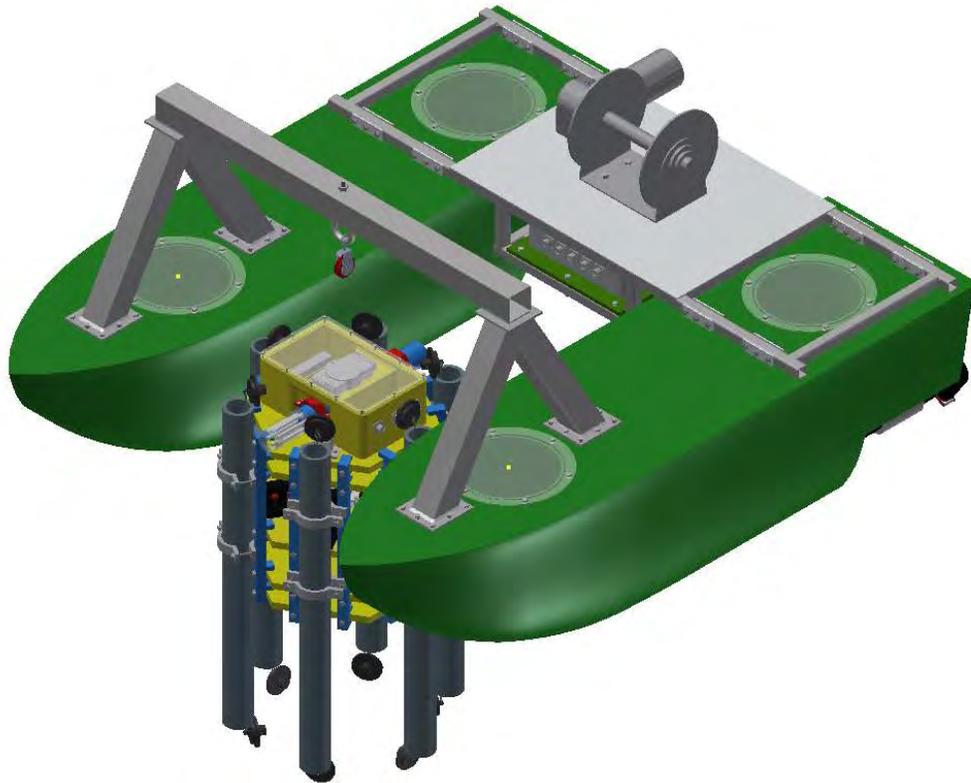


Figura 2.1. Vista Isométrica del USV.
Fuente: Propia.

El USV debe cumplir la función de recolectar data de los parámetros físicos ‘in situ’, para esto se seleccionó una sonda multiparametro, estos dispositivos cuentan con un arreglo de sensores y con su tarjeta de adquisición que realiza todo el procesamiento de la señal. Adicionalmente, la mayoría de sondas cuentan con sensores de profundidad que siendo este un dato importante para la realimentación que permite el control del movimiento del cabestrante. El movimiento del USV se lograra por medio del uso de un arreglo de propulsores, este arreglo usara el mismo principio del movimiento diferencial que se aplica en los robots móviles. Todo el control del USV será llevado a cabo por un sistema embebido, el cual tendrá que ser operado y

transmitir información mediante comunicación inalámbrica; asimismo el USV debe contar con cámaras que le permitan poder ver el recorrido y evitar cualquier colisión con objetos en el lago. En la Figura 2.2 se pueden apreciar las vistas principales del USV donde se pueden observar algunos de los componentes mencionados.

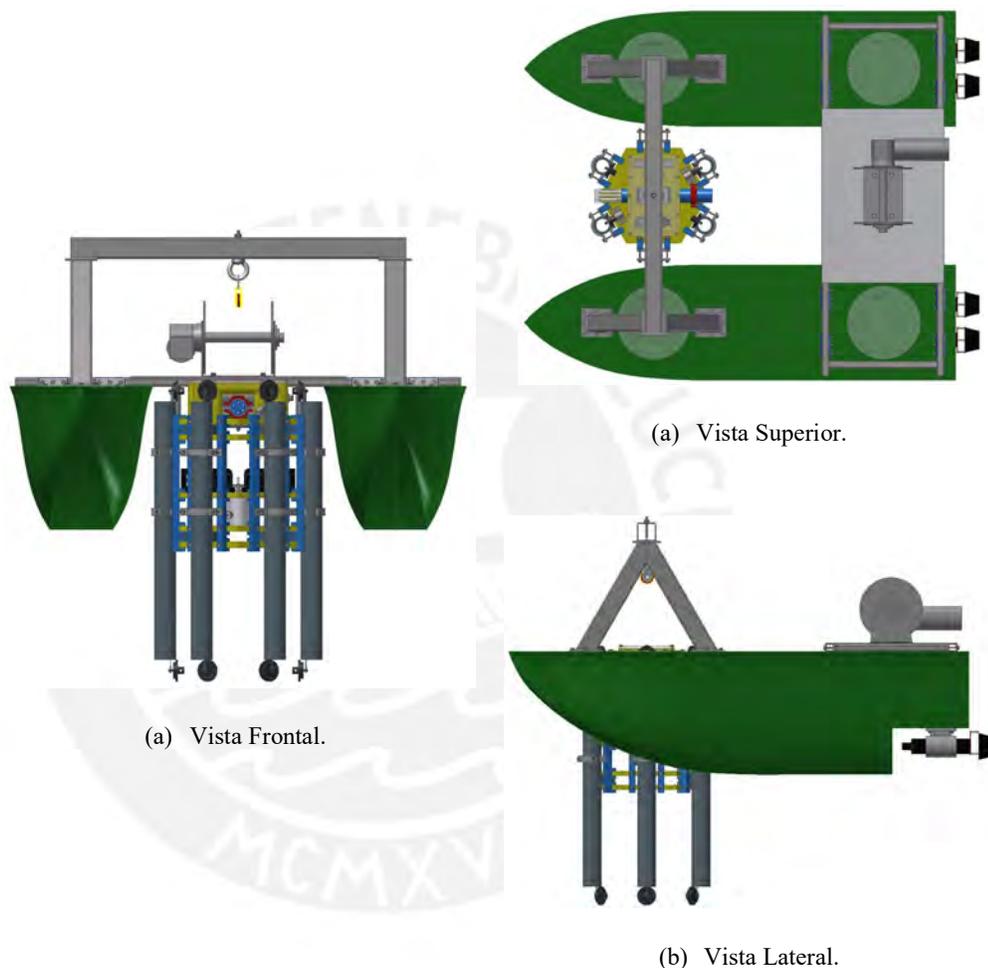


Figura 2.2. Vistas principales del USV.
Fuente: Propia.

El funcionamiento del USV será el siguiente, un operario o usuario controlará el movimiento mediante una computadora (PC o laptop). Esta data será enviada de manera inalámbrica al embebido el cual procesará la información y decidirá si moverse o realizar la recolección, en paralelo el embebido estará mostrando las imágenes de las cámaras al operario a través de la interfaz de usuario. Para poder iniciar el proceso de recolección, será el operario que indique mediante la interfaz el inicio de esta

operación. En la Figura 2.3 se describe gráficamente el proceso del funcionamiento total del sistema.

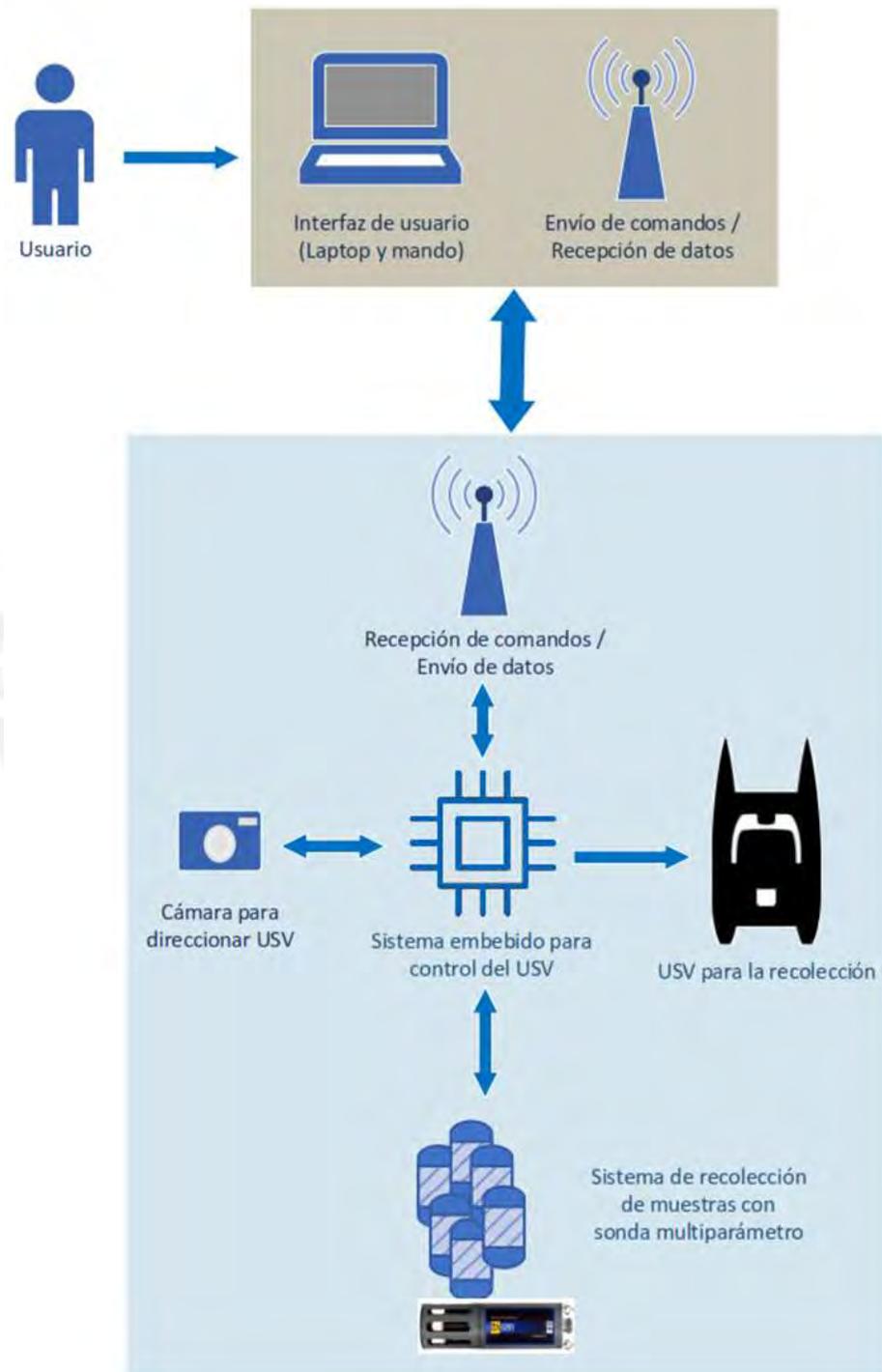


Figura 2.3. Diagrama de bloques de funcionamiento.
Fuente: Propia

2.2 Sistema Mecánico

El sistema mecánico del USV está dividido en tres partes principales; cada una cumpliendo una función importante del proceso de recolección de muestras. El primer subsistema es el recolector de muestras, que será sumergido en el lago y encapsulara el agua. El segundo subsistema es el mecanismo de ascenso y descenso, aquí se incluye todos los componentes mecánicos que se usarán para sumergir el recolector. Y finalmente, el último subsistema es la embarcación que soportara todo los mecanismos. El sistema en conjunto tiene en total las siguientes dimensiones: el largo es aproximadamente 1.5 m, el ancho y alto tienen aproximadamente 1.3 m; con estas dimensiones se cumple el requisito de que las dimensiones sean menores a 2.0 m. En la Figura 2.4 se pueden ver las partes que componen el sistema mecánico y las dimensiones principales del sistema.

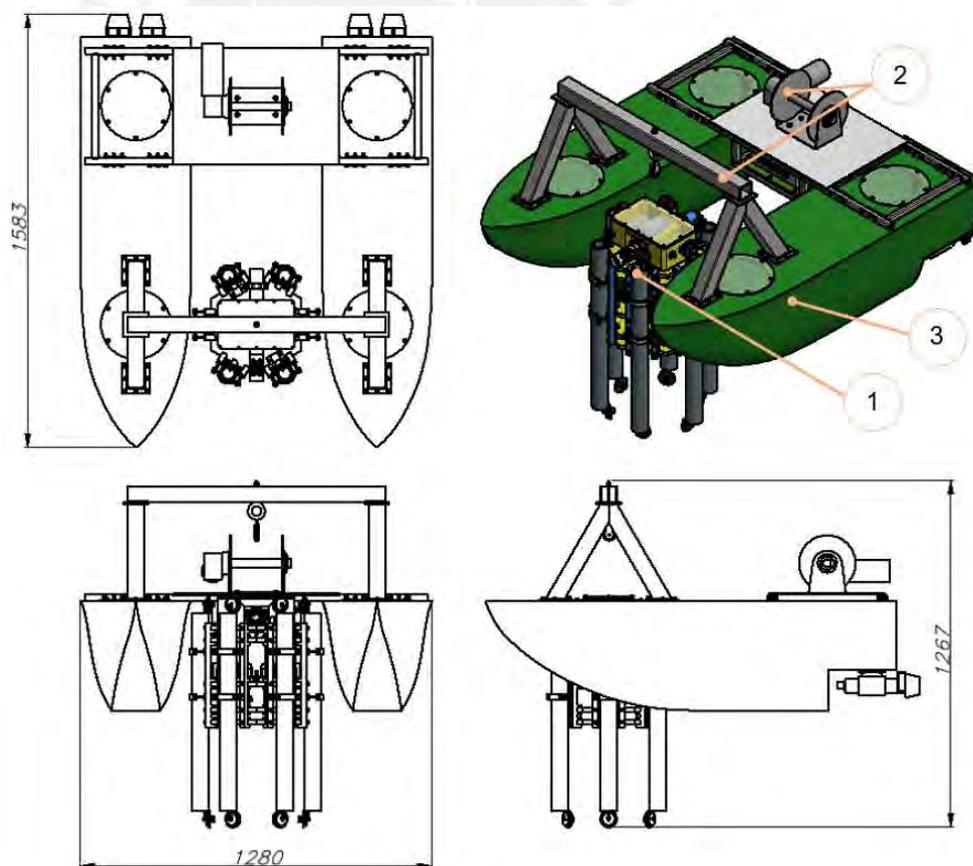


Figura 2.4. Subsistemas y dimensiones del USV. 1) Recolector de muestras. 2) Mecanismo de ascenso y descenso. 3) Embarcación USV.

Fuente: Propia.

En la presente sección, se presentara detalladamente la explicación de los subsistemas, los componentes de cada uno, las formas constructivas que se diseñaron, los materiales seleccionados, las uniones entre los componentes y algunos detalles de fabricación de la estructura. Para facilitar la comprensión de desarrollo mecánico del USV, se decidió dividir la explicación en las tres partes principales que componen.

2.2.1 Recolector de muestras

El recolector de muestras cuenta con tres partes principales que lo componen, la primera parte seria el contenedor de la muestra, el segundo el mecanismo que activa la recolección y por último la estructura que soporta todo que será llamada “Rack”. En la Figura 2.5 se puede observar las partes principales del recolector de muestras.

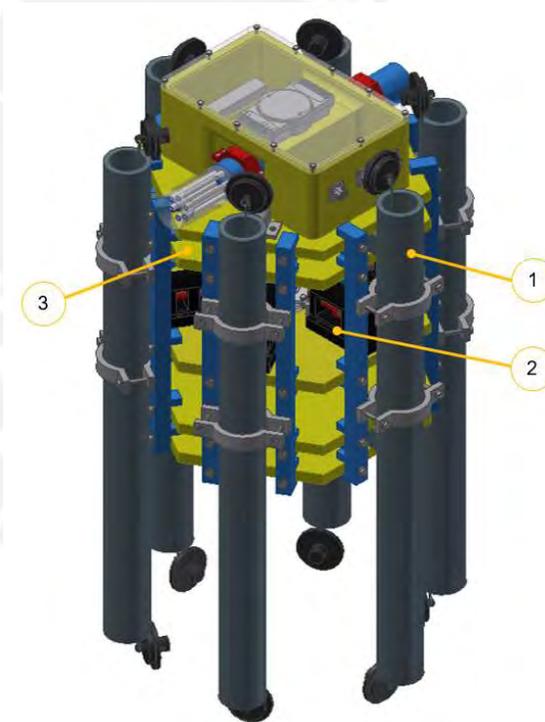


Figura 2.5. Partes del recolector de muestras. 1) Botella Niskin. 2) Mecanismo de activación. 3) Rack.
Fuente: Propia.

El recolector de muestras tiene una forma simplificada para un ensamble simple. Es por este motivo que se escogió una estructura con diferentes niveles, en cada nivel se encuentra una pieza hexagonal, esto debido a que se debían posicionar 6 botellas Niskin y cada lado soportaría un contenedor. La separación entre niveles quedo definida por los sujetadores que poseen la botella Niskin, estos quedan en medio de

los niveles lo que impide que la botella se voltee. En la Figura 2.6 se muestran las piezas que conforman los pisos de la estructura.



Figura 2.6. Piezas hexagonales que conforman el rack.
Fuente: Propia.

Como se ve se tiene 2 tipos de piezas hexagonales, las dos son completamente iguales con la diferencia de que la segunda cuenta con un agujero circular, este se encuentra en el medio y permite que pase el eje del actuador. Para la unión de las piezas hexagonales se decidió la utilización de unos soportes que tienen encajes en los cuales se colocan las planchas. Estos soportes se colocaran 2 por lado, lo que permite mejorar la estabilidad del rack y sirve para colocar unos sujetadores adicionales para evitar el deslice de las botellas Niskin. En la Figura 2.7 se puede ver como encajan las planchas con el soporte, el cual se une mediante tornillos.



Figura 2.7. Soporte vertical del rack.
Fuente: Propia.

Debido a que la función principal del recolector de muestras es la obtención de muestras representativas a distintas profundidades, lo que significa que el recolector estará en constante contacto con el agua, es necesario que el material con el cual se fabrique el soporte cuente con propiedades anticorrosivas; es este el principal motivo por el cual se escogió el uso del HDPE (Polietileno de alta densidad). Asimismo se escogió este material debido a que se puede adquirir en planchas y las formas que se desean se pueden fabricar fácilmente mediante una fresadora. A continuación, se muestra en la Tabla 2.1 las principales propiedades de HDPE.

Tabla 2.1. Propiedades del Polietileno de Alta Densidad (HDPE)

Fuente: <http://www.professionalplastics.com/>

Propiedad	Valor
Densidad	0.94 – 0.96 g/cm ³
Esfuerzo de fluencia	19 – 35 MPa
Perdida de material debido a la corrosión en el agua	< 0.5%
Formación de hinchazones debido a la corrosión	< 3%

En los soportes de unión de la planchas se posicionan 4 agarraderas que permiten una mejor sujeción de las botellas Niskin, estas agarraderas tienen una parte de goma o caucho que evita el deslizamiento de los contenedores. El material de las agarraderas será aluminio anodizado, debido a que la anodización permite mejorar la resistencia frente a la corrosión y aumenta el tiempo de vida de los elementos; la unión del caucho con el aluminio será realizada mediante el uso de pegamento multipropósito a prueba de agua, su composición es en base a tolueno y hexano.



Figura 2.8. Agarradera de las botellas Niskin.

Fuente: Propia.

La instalación de estas agarraderas será mediante tornillos que se conectarán al soporte vertical del rack, en cada contenedor se contará con 2 pares de agarraderas. En la Figura 2.9 se puede observar cómo están unidas las agarraderas con el soporte y el contenedor, se puede apreciar como el caucho hace contacto con el contenedor y debido a la fricción generada entre ambos este impide el deslizamiento entre ellos.

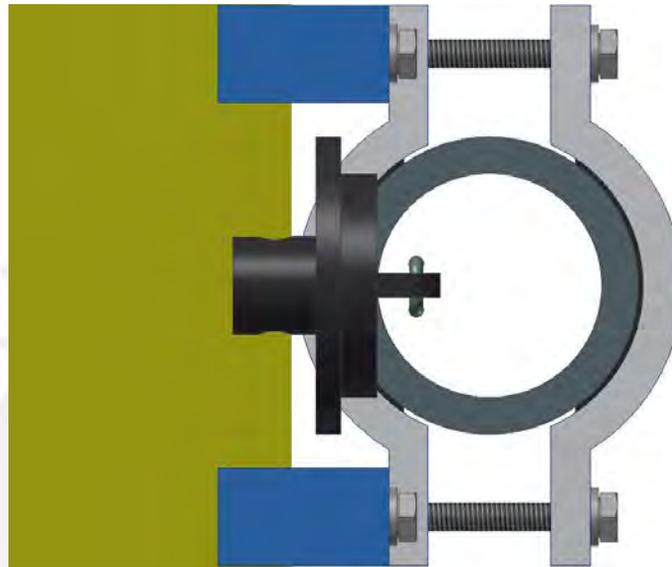
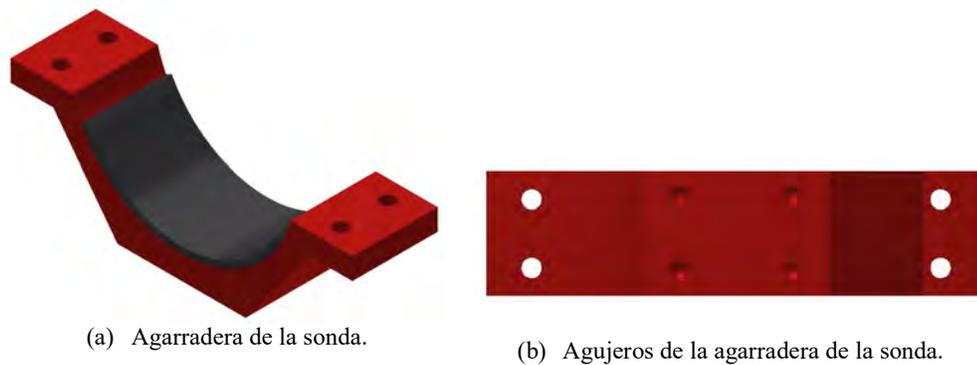


Figura 2.9. Conexiones de las uniones de las agarraderas para las botellas Niskin.
Fuente: Propia.

Adicionalmente a las botellas Niskin el recolector debe de soportar el conjunto de sensores (sonda multiparametro), los mecanismos de activación o liberación y la caja de componentes electrónicos. Para la sujeción de la sonda multiparametro se utilizaron, al igual que con los contenedores, agarraderas con caucho ajustadas a presión para evitar deslizamiento. La diferencia con las agarraderas de las botellas Niskin radica en la forma, estas están diseñadas de manera que puedan ser sujetadas mediante tornillos es por eso que posee una base cuadrada con agujeros ciegos (Figura 2.10); estos se ensamblan en el la pieza hexagonal superior del rack. El material de esta segunda agarradera es el mismo que se utilizó en las agarraderas de las botellas Niskin, el pegamento usado para la unión del caucho y el aluminio será el mismo mencionado anteriormente.



(a) Agarradera de la sonda.

(b) Agujeros de la agarradera de la sonda.

Figura 2.10. Agarradera de la sonda multiparámetro.
Fuente: Propia.

La instalación de estas agarraderas será en la tapa superior del rack mediante 8 tornillos, la sonda será aprisionada por 2 pares de agarraderas que evitaran que esta deslice. En la Figura 2.11 se ve la conexión mediante tornillos auto-roscantes que se realiza para sujetar la sonda y se ve cómo se acoplan las agarraderas a la pieza hexagonal superior del rack por medio de los tornillos a través de los agujeros ciegos.

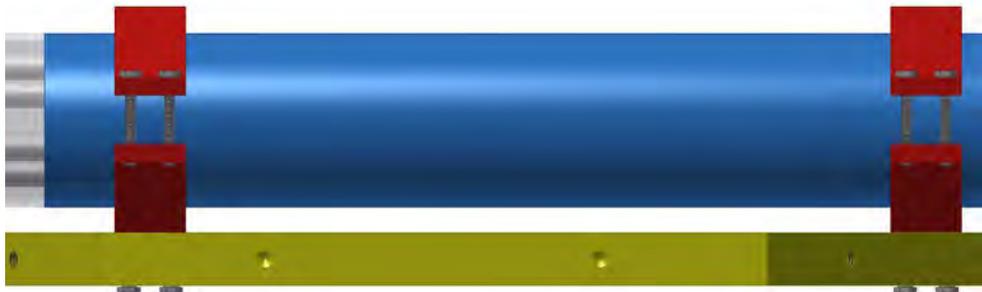


Figura 2.11. Sujeción de la sonda en el rack.
Fuente: Propia.

Una vez detallado todo lo respectivo al rack de soporte se explicara el diseño de sistema de liberación o activación de la toma de muestras; este sistema está compuesto por un eje, un resorte, un eslabón y la estructura donde se encuentra todo ensamblado. En la Figura 2.12 se observan los componentes del sistema mencionado.

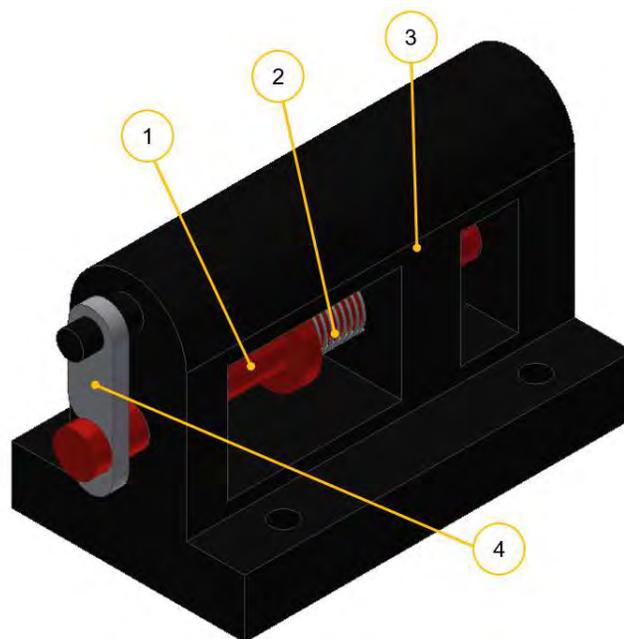


Figura 2.12. Sistema de liberación o activación de recolección de las botellas Niskin. 1) Eje. 2) Resorte. 3) Estructura. 4) Eslabón.
Fuente: Propia.

El eje del mecanismo está diseñado de tal forma que pueda albergar un resorte, el cual está comprimido en un inicio para poder mantener la botella Niskin abierta; la botella cuenta con dos cuerdas que se estiran para evitar que se cierre debido a la fuerza que ejerce el material elástico que une las dos tapas. El eje diseñado debe soportar la corrosión por este motivo se escogió el aluminio anodizado como material de fabricación. En la Figura 2.13 se puede ver la forma que al inicio del eje posee una ranura que sirve para colocar el seguro, luego se observa una sección de mayor diámetro para que pueda presionar el resorte y al final una terminación en punta que evita que las cuerdas se atoren al momento de ser soltada.



Figura 2.13. Eje del mecanismo de liberación.
Fuente: Propia.

El segundo componente del mecanismo de liberación o activación es un eslabón que funciona como un seguro, este comprime el resorte y evita que las cuerdas se liberen y cierren la botella Niskin. Una vez activada la recolección el seguro es removido por medio de un actuador con esto el resorte vuelve a su posición inicial, empujando el eje y logrando que las cuerdas se suelten con lo que el agua queda encapsulada. La secuencia de funcionamiento del mecanismo de liberación se muestra en la Figura 2.14 y la Figura 2.15, en la primera se muestra la posición inicial y en la siguiente la posición final. El material del eslabón es aluminio anodizado, que como se mencionó antes evita la corrosión del eje.

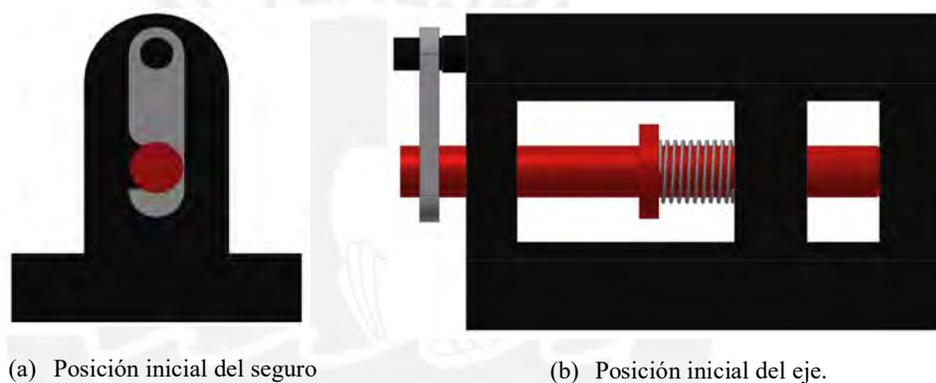


Figura 2.14. Posición inicial de trabajo de mecanismo de liberación.
Fuente: Propia.

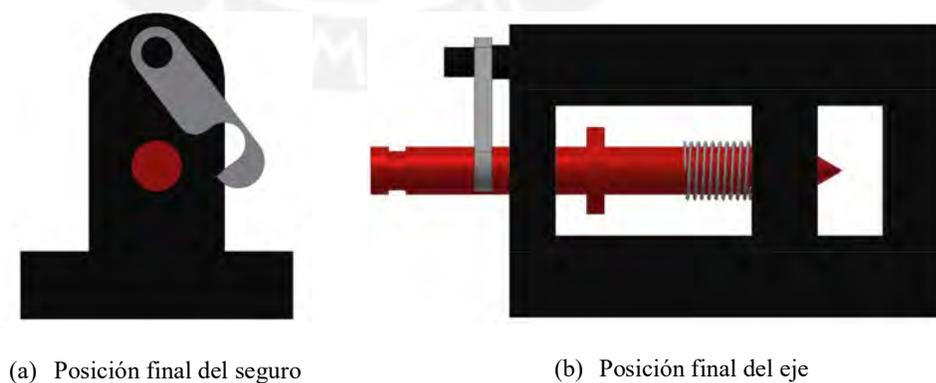


Figura 2.15. Posición final de trabajo de mecanismo de liberación.
Fuente: Propia.

El último componente del mecanismo de liberación es la base que contiene al eslabón, al eje y al resorte. Esta pieza tiene dos agujeros por los cuales debe pasar eje y en la

cara final un agujero en donde encaja la terminación cónica del eje; asimismo existe un tope intermedio que es el encargado junto al eje de soportar el resorte. En la Figura 2.16 se puede ver como entre el eje y la pared intermedia aprisionan el resorte comprimiéndolo, también en la Figura 2.17 se puede observar el agujero final para el encaje con el eje que no permitirá a las cuerdas deslizar hasta el momento en que se active el sistema.

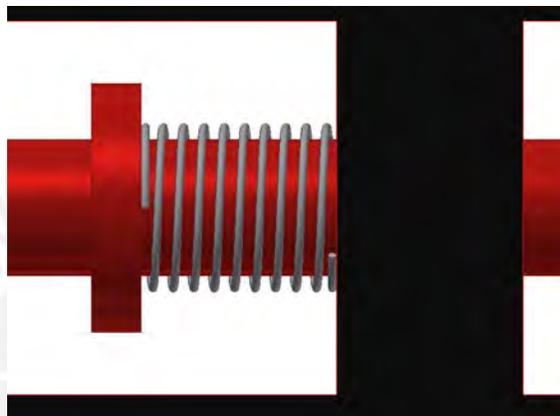


Figura 2.16. Método de aprisionamiento del resorte en el mecanismo de liberación.
Fuente: Propia.

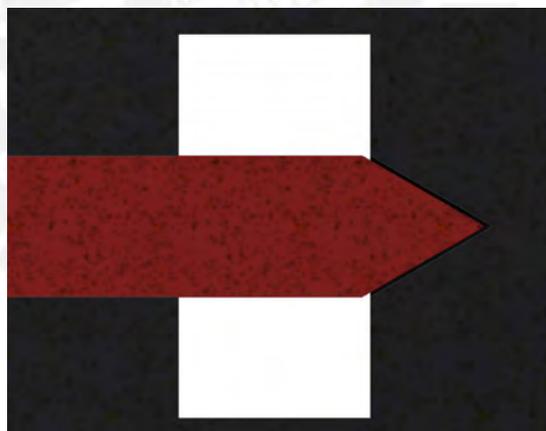


Figura 2.17. Agujero final para el encaje del eje.
Fuente: Propia.

Para finalizar la descripción del soporte se hablara del material seleccionado, este material, al igual que las piezas hexagonales mencionadas anteriormente, es el HDPE; la principal razón es la resistencia a la corrosión.

2.2.2 Mecanismo de ascenso - descenso

Este componente del USV es el encargado de soportar el peso del recolector de muestras descrito anteriormente, para esto se utilizan 4 componentes principales; estos son una estructura de soporte, una polea, un cáncamo y un cabestrante. Como se ve en la Figura 2.18 este mecanismo está separado en 2, la primera parte esta solo dedicado a la sujeción del recolector; en cambio la segunda es la encargada de todo el movimiento de ascenso y descenso. Adicionalmente, la forma de transmisión de movimiento es a través de una cuerda, que no se muestra en la imagen.

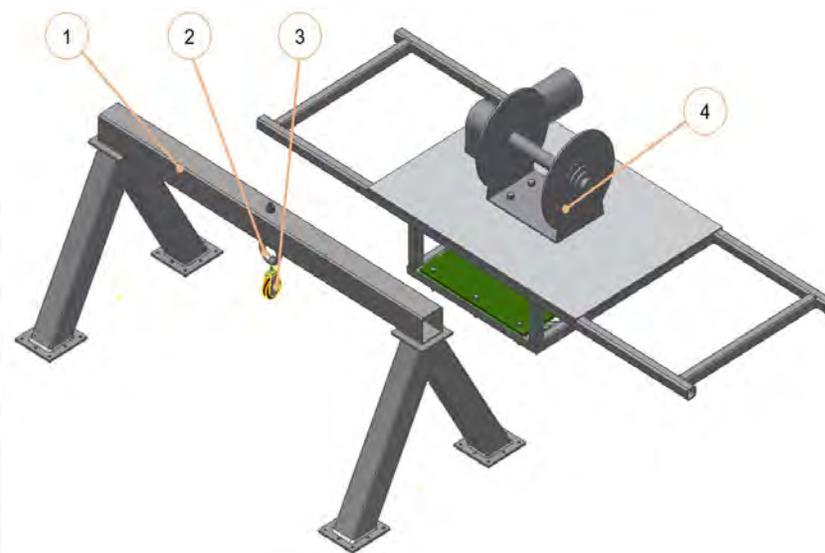


Figura 2.18. Mecanismo Ascenso- Descenso 1) Soporte. 2) Cáncamo. 3) Polea. 4) Cabestrante.
Fuente: Propia

El primer componente es el soporte de la estructura, toda la estructura está hecha de tubos cuadrados de 60x60 mm de un espesor de 3 mm; se usa un tubo a lo largo el cual esta soportado en cada lado por otros 2 de modo que estos dos formen un triángulo. El motivo de esta forma triangular es para distribuir mejor las fuerzas y que el soporte sea más seguro. El material escogido para esta estructura es acero ASTM A-500, las características de este material se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Propiedades del Acero ASTM A-500
Fuente: <http://www.tradisa.com.pe>

Propiedad	Valor
Peso	0.94 – 0.96 g/cm ³
Esfuerzo de fluencia	270 MPa
Resistencia Máxima	350 MPa

En la Figura 2.19 se puede ver la explicación anterior de la posición de los tubos que se encuentran en los extremos del tubo central, además se puede observar que se usaron planchas de acero para la unión de los soportes laterales con la viga central. La unión de toda la estructura es soldada, los cordones de soldadura se pueden ver en la Figura 2.20 y en la Figura 2.21; para finalizar con la estructura cabe recalcar que esta será pintada con una pintura anticorrosiva, esta pintura posee componentes epóxicos que retrasan la corrosión del material.

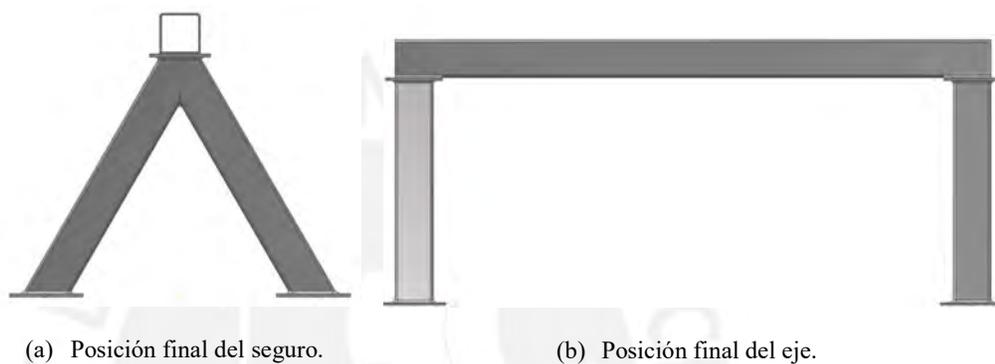


Figura 2.19. Estructura de soporte.
Fuente: Propia.



Figura 2.20. Soldadura entre la plancha inferior y el tubo de soporte.
Fuente: Propia.



Figura 2.21. Soldadura en la plancha superior de unión entre los soportes y el tubo central.
Fuente: Propia.

Los siguientes componentes de importancia que se tienen son comerciales y han sido seleccionados basándose en la carga que era necesaria soportar. El cáncamo es un elemento de sujeción que cuenta con un eje roscado, el cual atraviesa los perfiles o vigas. En el diseño, este elemento era necesario debido a que sujeta la polea, en la Figura 2.22 se puede observar como el cáncamo atraviesa la viga central y es asegurado por una tuerca en la parte superior; el cáncamo seleccionado cuenta con una rosca del tipo M8, este tiene una longitud de más de 60 mm (tamaño del tubo); estos soportan altas cargas que llegan al orden de las toneladas.



Figura 2.22. Conexión entre el cáncamo y el tubo cuadrado central de la estructura.
Fuente: Propia.

El siguiente componente es la polea, para la selección de esta se tuvo en consideración que la cuerda se desplaza a lo largo del tambor del cabestrante; por lo que la polea debe girar alrededor de un eje perpendicularmente al desplazamiento de la cuerda en el tambor. Por este motivo se buscó una polea que sea capaz de cumplir esta tarea, el ancho de la polea se determinó de manera que el cable de sujeción junto con el cable de comunicación puedan pasar juntos. Se seleccionó un cable de acero inoxidable de 3 y un cable de comunicación de diámetro de 5.5 mm; por lo que como mínimo el diámetro de la cuerda es 8.5 mm. La polea seleccionada cumple con todos los requisitos, en la Figura 2.23 se muestra la y sus principales características se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Características Polea 03 180.

Fuente: <http://www.bartonmarine.com/>

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>
Tamaño (W x H)	46 x 108 mm
Carga máxima	385 kg
Tamaño cuerda	Hasta 10 mm
Precio	£ 15



Figura 2.23. Polea 03 180.

Fuente: <http://www.bartonmarine.com/>

El siguiente elemento del mecanismo es el cabestrante este es el encargado de generar el movimiento para que la cuerda pueda descender y ascender el recolector, de este mecanismo se necesitaba que sea pequeño en dimensiones (no mayor a 350 mm x 350 mm x 250 mm) y en peso máximo de 20 kg de modo que los cascos puedan soportar su carga. Adicionalmente, el cabestrante tenía que poder ser activado con corriente continua para facilitar el diseño de la parte electrónica y el control; la mayoría de cabestrantes encontrados ocupaban mucho espacio, consumían alta potencia o funcionaban con corriente alterna. En el proceso de búsqueda se encontró el cabestrante GX1, este cumplía con los requerimientos mencionados y fue el seleccionado en la Figura 2.24 se muestra el cabestrante y en la Tabla 2.4 sus características.

Tabla 2.4. Características GX1.

Fuente: <http://lonestarmarine.com.au/>

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>
Potencia	600 W
Voltaje	12 VDC
Carga máxima	100 kg
Capacidad	75 m @ cuerda de 6 mm
Precio	1071 AUD



Figura 2.24. Cabestrante GX1.
Fuente: <http://lonestarmarine.com.au/>

El cabestrante va unido al USV mediante un soporte que además cuenta con el compartimiento de la parte electrónica, el cabestrante viene con sus propios pernos los cuales son empernados a la base del soporte como se ve en la Figura 2.25, cabe recalcar que el material cabestrante de aluminio 6061 y acero inoxidable AISI 316, ambos materiales son resistentes a la corrosión.

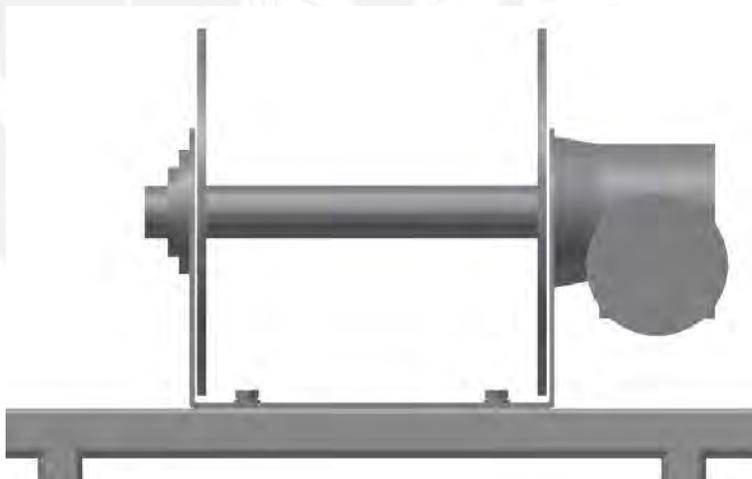


Figura 2.25. Conexión del Cabestrante al soporte posterior.
Fuente: Propia.

2.2.3 Embarcación USV

Para la selección del tipo de embarcación se tomó en consideración la necesidad de estabilidad para la recolección de muestras y velocidad, por este motivo se consideró el catamarán como el tipo de embarcación ideal. El catamarán al poseer dos cascos logra que la altura metacéntrica sea mayor lo que logra mayor estabilidad; asimismo el poseer dos cascos reduce el área de contacto con el fluido, pero aumenta el volumen sumergido, produciendo alto empuje por menor resistencia. El material escogido para la fabricación de los cascos del catamarán es la fibra de vidrio, es un material comúnmente usado en la fabricación de embarcaciones, debido a su resistencia a la corrosión y larga duración. En la Tabla 2.5 se muestra algunas de las propiedades de la fibra de vidrio.

Tabla 2.5. Propiedades de la fibra de vidrio clase E.

Fuente: <http://fibradevidriouno.com/>

Propiedad	Valor
Densidad	2.58 g/cm ³
Tensión de rotura	3445 MPa
Esfuerzo de compresión	1080 MPa
Temperatura de ablandamiento	846 °C
Conductividad térmica	0.05 W/(m.K)
Precio por kg	~2 USD

A continuación, se mostrarán los cálculos realizados para el diseño del casco, en el cual se busca tener un alto empuje en un

2.2.3.1 Cálculo de los cascos

En esta sección se explicará el procedimiento realizado para el diseño de los cascos del USV, para esto se usó el libro “Basic Ship Theory” [34] y la guía de diseño de catamarán de Terho Halme [35]. Antes de empezar con el procedimiento de cálculo se realizará un breve resumen de la metodología, en donde se explicarán los términos, coeficientes y fórmulas que se van a utilizar. En primer lugar tenemos las dimensiones principales del casco son la longitud del casco (L_h), longitud del plano de agua (L_{WL} o L_{PP}), la altura sumergida (T_c o T) y el ancho del plano de agua (B_{WL} o B). En la Figura 2.26 se ven las dimensiones del casco.

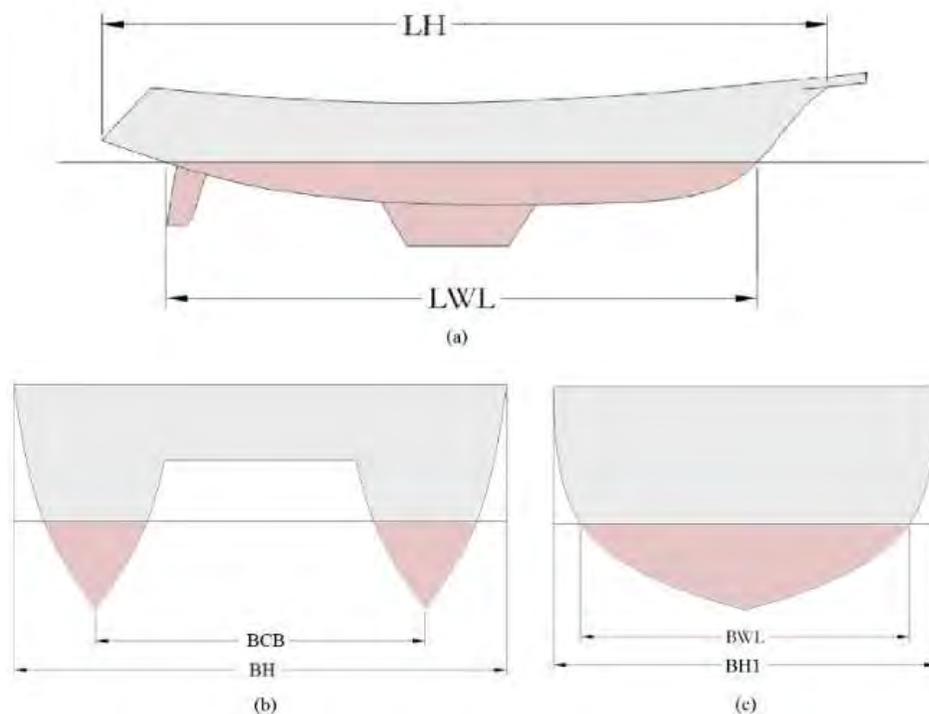


Figura 2.26. Dimensiones de un catamarán. (a) Vista de perfil. (b) Vista frontal. (c) Vista frontal.
Fuente: <http://marine.marsh-design.com/content/length>

Entre otras características tenemos el área del plano de agua (A_w), el área media (A_M) y el volumen desplazado (Δ). Con esto se puede describir los diferentes coeficientes y relaciones de diseño.

- Relación longitud – ancho del casco (LBR): nos da la idea de cuan esbelto es el casco; a valores pequeños incrementan la capacidad de carga y valore altos incrementan la velocidad.

$$LBR = \frac{LWL}{BWL} \quad (1)$$

- Relación ancho – altura sumergida (BTR): tiene un efecto directo en la resistencia del casco, valores cercanos a 2 reducen la resistencia a la fricción.

$$BTR = \frac{BWL}{T_c} \quad (2)$$

- Coefficiente del plano de agua (C_W): Es la relación entre el área del plano de agua con un rectángulo circunscrito, valores esperados van desde 0.7 – 0.9. Se puede apreciar la comparación de áreas en la Figura 2.28 (a)

$$C_W = \frac{A_W}{B_{WL} \cdot L_{WL}} \quad (3)$$

- Coefficiente de área media (C_M): Es la relación entre el área media sumergida con un rectángulo con las medidas de ancho (B_{WL}) y profundidad (T_C), valores varían de acuerdo a la forma del casco (Figura 2.27). Se puede apreciar la comparación de áreas en la Figura 2.28 (b).

$$C_M = \frac{A_M}{B_{WL} \cdot T_C} \quad (4)$$

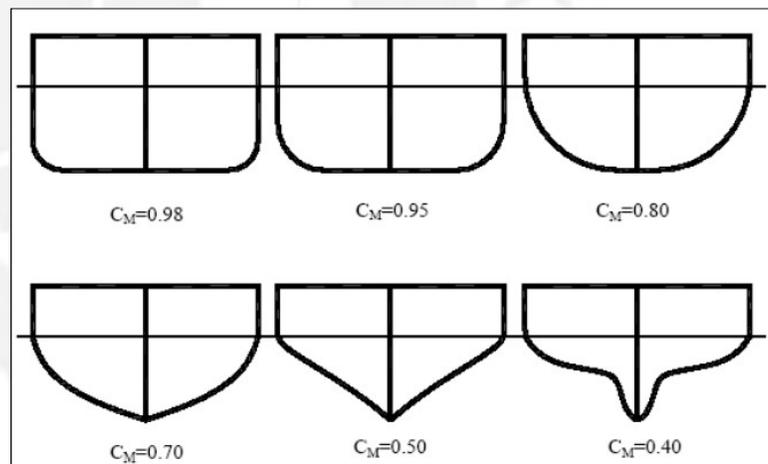


Figura 2.27. Valores del coeficiente de área media según la forma de los cascos.
Fuente: http://oa.upm.es/14340/2/Documentacion/3_Formas/SD-1.5.1-Hull%2520Form.pdf

- Coefficiente de bloque (C_B): Es la relación entre el volumen desplazado con un paralelepípedo de medidas B_{WL} , T_C y L_{WL} ; en promedio el valor debería ser 0.88 pero puede variar según el tipo de embarcación. Se puede apreciar la comparación de volúmenes en la Figura 2.28 (c).

$$C_B = \frac{\Delta}{B_{WL} \cdot T_C \cdot L_{WL}} \quad (5)$$

- Coefficiente prismático (C_P): Es la relación entre el volumen desplazado con un volumen de longitud del plano de agua (L_{WL}) por el área media (A_M); el valor suele exceder el 0.55. Se puede apreciar la comparación de áreas en la Figura 2.28(d)

$$C_P = \frac{\Delta}{A_m \cdot L_{WL}} \quad (6)$$

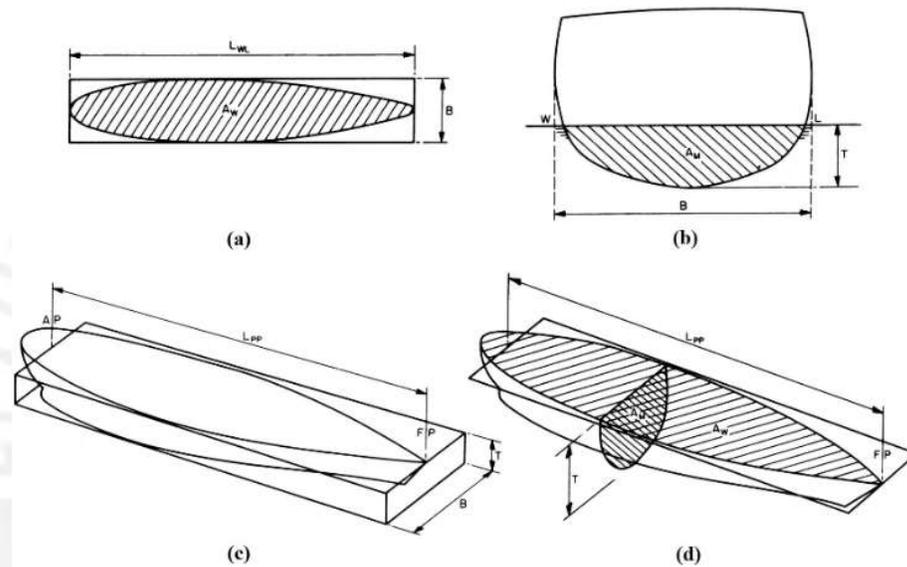


Figura 2.28. Visualización de los coeficientes. (a) C_W . (b) C_M . (c) C_B . (d) C_P .
Fuente: Basic Ship Theory Volume I [34]

Una vez definido todo lo necesario para el diseño del casco, quedaría por definir las dimensiones y relaciones que involucran la estabilidad y máxima carga que puede soportar el catamarán. La carga máxima (m_{LDC}) se calcula haciendo uso del principio de Arquímedes, este propone que la fuerza de empuje que afecta a un masa inmersa en un líquido es igual al peso del líquido desplazado; por este motivo la carga máxima se define con la siguiente formula:

$$m_{LDC} = 2 \cdot \Delta \cdot \rho \quad (7)$$

$$m_{LDC} = 2 \cdot C_p \cdot L_{WL} \cdot A_m \cdot \rho \quad (8)$$

$$m_{LDC} = 2 \cdot C_p \cdot L_{WL} \cdot C_m \cdot B_{WL} \cdot T_c \cdot \rho \quad (9)$$

Adicionalmente, se tiene que calcular la separación entre cascos (B_{CB}) y el ancho total (B_{H1}) del casco para analizar estabilidad basados en la distancia a los metacentros (BM_T , BM_L). Para la separación se tiene una relación (LBRC), que relaciona el largo del casco con la separación; a menor separación la carga es menor y demasiada separación lo vuelve pesado.

$$LBRC = \frac{L_H}{B_{CB}} \quad (10)$$

Para la estabilidad se busca que los dos metacentros, punto donde se intersectan las rectas perpendiculares al plano de agua y pasan por el centro de flotación, sean iguales y se usan las siguientes formulas.

$$BM_L = 2 \cdot \left[\frac{B_{WL}^3 \cdot L_{WL} \cdot C_w^2}{12} + L_{WL} \cdot B_{WL} \cdot C_w \cdot (0.5 \cdot B_{CB})^2 \right] \cdot \frac{\rho}{m_{LDC}} \quad (11)$$

$$BM_T = 2 \cdot 0.92 \left[\frac{L_{WL}^3 \cdot B_{WL} \cdot C_w^2}{12} \right] \cdot \frac{\rho}{m_{LDC}} \quad (12)$$

A continuación, se presenta el cálculo realizado para el casco diseñado, si el casco no fuera capaz de soportar la carga de todo el sistema que se estima serian un 180 kg se tendría que modificar las dimensiones del casco.

$$L_{WL} = 1.45 \text{ m}$$

$$B_{WL} = 0.35 \text{ m}$$

$$T_C = 0.30 \text{ m}$$

Según el diseño del inventor los valores de las áreas y el volumen desplazado tendrían los siguientes valores:

$$A_M = 0.086 \text{ m}^2$$

$$A_W = 0.46 \text{ m}^2$$

$$\Delta = 0.104 \text{ m}^3$$

Ahora se calcularan los coeficientes necesarios para poder realizar el cálculo del empuje total del USV:

$$C_P = \frac{\Delta}{A_M \cdot L_{LW}} = \frac{0.104}{0.086 \cdot 1.45} = 0.828$$

$$C_M = \frac{A_M}{B_{WL} \cdot T_C} = \frac{0.086}{0.35 \cdot 0.30} = 0.823$$

$$m_{LDC} = 2 \cdot C_p \cdot L_{WL} \cdot C_m \cdot B_{WL} \cdot T_c \cdot \rho$$

$$m_{LDC} = 2 \cdot 0.828 \cdot 1.45 \cdot 0.823 \cdot 0.35 \cdot 0.3 \cdot 1025$$

$$m_{LDC} = 212.824 \text{ kg}$$

Con esto confirmamos que el diseño va a soportar toda la carga del USV, ya que el empuje de todo los casco es de 212.8 kg, ahora se calcularan las relaciones principales para comprobar que se encuentren en los rangos recomendados

$$LBR = \frac{LWL}{BWL} = \frac{1.45}{0.35} = 4.14$$

$$BTR = \frac{BWL}{T_c} = \frac{0.35}{0.30} = 1.17$$

Como se ve la relación BTR se encuentra en aproximadamente 1.2, lo que indica que la relación fricción-empuje se encuentra en un valor medio; para el caso de este asco se encuentra en valores adecuados, debido a lo que se busca es un alto empuje.

Una vez finalizado la explicación del cálculo del casco, se seguirá detallando los detalles de la embarcación; estos se muestra en la Figura 2.29, se observa que posee dos tapas circulares que sirven para la instalación de los propulsores y para la instalación del soporte del recolector; adicionalmente cuenta con agarraderas que van incrustadas a la fibra de vidrio. En el proceso de fabricación del casco se pueden hacer incrustaciones de diferentes tipos, de modo que estas piezas queden atrapadas por la fibra de vidrio evitando realizar agujeros que podrían permitir la filtración de agua.

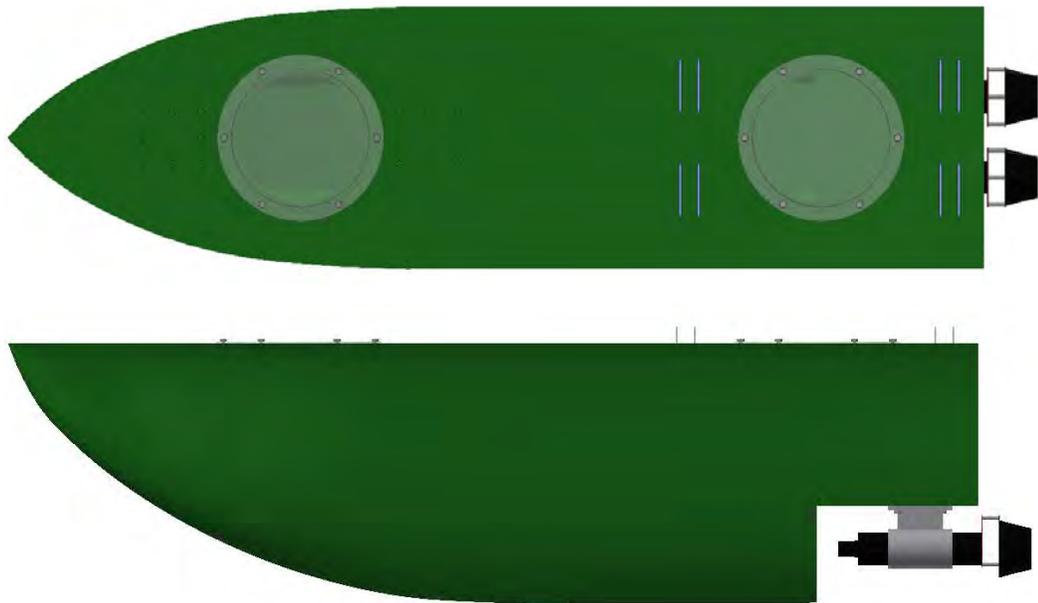


Figura 2.29. Casco del USV.
Fuente: Propia.

Como medida de seguridad para evitar filtraciones por las tapas circulares de acrílico se colocaron O-ring entre esta y el casco, estos son estándar de acuerdo a la norma AS-568 que especifica las dimensiones de estos y del canal que debe albergarlos. Para asegurar la tapa se pusieron tuercas incrustadas a la fibra de modo que la tapa se pueda ensamblar fácilmente mediante pernos (Ver Figura 2.30).

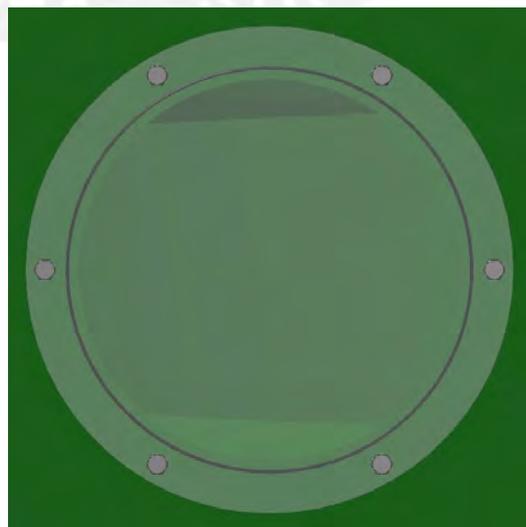


Figura 2.30. Tapa en el casco del USV.
Fuente: Propia.



Figura 2.31. Detalle de la incrustación de tuercas en el USV.
Fuente: Propia.

El segundo detalle son las incrustaciones de un sujetador, este permite el soporte de la base del cabestrante; al igual que las tuercas se incrustan durante fabricación. Cada casco cuenta con cuatro sujetadores que, dos para cada brazo de la base. En la Figura 2.32 se puede ver la incrustación del sujetador solo y en la siguiente figura se puede ver la disposición de los sujetadores en el casco.

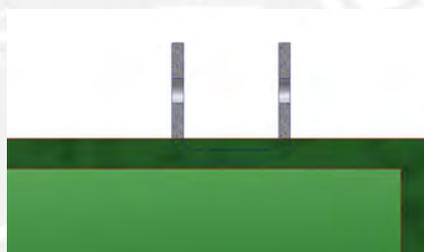


Figura 2.32. Incrustación del sujetador en el USV.
Fuente: Propia.

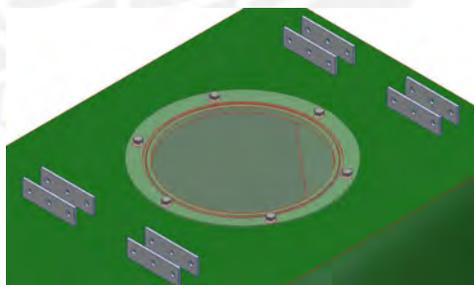


Figura 2.33. Disposición de los sujetadores en el USV.
Fuente: Propia.

Otro detalle importante del casco es que en los agujeros que se usan para sujetar el soporte del recolector se tiene pequeños O-ring que impiden el ingreso de agua por estos orificios, además de esto las arandelas de los pernos serán de caucho de modo que impida la filtración por el hilo de la longitud roscada. En la Figura 2.34 se puede ver este detalle del casco.

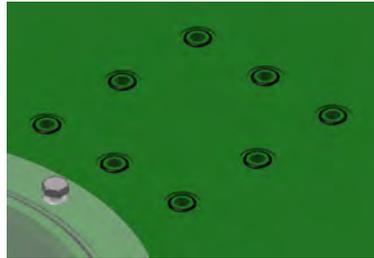


Figura 2.34. Detalle de los canales para los O-ring en la unión del soporte.
Fuente: Propia.

El último componente del casco es el soporte de los propulsores, este fue diseñado de tal forma que se impida el movimiento axial y giratorio. En el diseño de este se hizo uso de los agujeros que posee el propulsor que se encuentran en la parte media y son cuatro. Adicionalmente, este soporte se sujeta al casco mediante pernos que al igual que en la unión con el soporte cuenta con pequeños O-ring para evitar el ingreso de agua al casco. El material del soporte es de aluminio anodizado, como varias de las partes anteriormente descritas; en la Figura 2.35 se puede ver la forma de soporte y en la Figura 2.36 como se une al casco.



Figura 2.35. Detalles del soporte del propulsor.
Fuente: Propia.



Figura 2.36. Conexión del soporte del propulsor.
Fuente: Propia.

2.2.2 Lista de planos del sistema mecánico

Luego de la descripción del sistema mecánico se presentara en la Tabla 2.6 una lista con los planos desarrollados del sistema para que el lector pueda encontrarlos fácilmente.

Tabla 2.6. Lista de planos.

Fuente: Propia

Plano	Descripción	Tamaño
L1	USV	A2
L2	SOPORTE DEL RECOLECTOR	A2
L3	PLANCHA INFERIOR	A4
L4	PLANCHA UNION	A4
L5	SOPORTE ELECTRÓNICO	A2
L6	PLANCHA CABESTRANTE	A4
L7	CAJA ELECTRÓNICA USV	A3
L8	PLANCHA ELECTRÓNICA	A4
L9	CASCO USV	A2
L10	CASCO	A2
L11	TAPA CIRCULAR	A4
L12	AGARRADERA CASCO	A4
L13	SOPORTE PROPULSOR	A3
L14	RACK NISKIN	A0
L15	AGARRADERA RACK	A4
L16	CAJA ELECTRÓNICA RACK	A3
L17	SOPORTE RACK	A4
L18	AGARRADERA NISKIN	A4
L19	AGARRADERA SONDA	A4
L20	PLANCHA HEXAGONAL	A4
L21	SOPORTE EJE	A3
L22	EJE	A4
L23	SEGURO EJE	A4
L24	PLANCHA HEXAGONA HUECO	A4

2.3 Sistema Electrónico

El sistema electrónico del USV para la facilidad de construcción se dividió en dos partes, cada una con una función particular en el control y obtención de parámetros físico-químicos del agua. La primera es toda la electrónica que se encuentra en la superficie del USV, esta logrará entablar comunicación de manera inalámbrica con la estación base; la segunda es toda la electrónica que estará sumergida y se encarga de la recolección de muestras. Para la comunicación de estas partes se decidió el uso del protocolo de comunicación RS485, que permite tener una comunicación de mayor velocidad a largas distancias (100 Kbps a 1200 m) a comparación del RS232 (19.2 Kbps a 15 m) [36]. En la Figura 2.37 se puede apreciar el diagrama de bloques que explica cómo funciona todo el sistema electrónico del USV.

En la “Electrónica de superficie” se encontraron todos los componentes necesarios para realizar el movimiento del USV (control de propulsores), localizarlo (GPS y Magnetómetro), para el ascenso – descenso del recolector (motor DC), para la comunicación inalámbrica (uso de Wireless Local area network - WLAN) y el sistema de cámaras para el direccionamiento; todo el sistema es controlado por el embebido que está a bordo. Asimismo, en esta parte fue necesario la realización de un sistema de alimentación, el cual consta de un conjunto de baterías LiPo que nos brinda el voltaje necesario para la operación de los propulsores; y junto a este una batería de 12 V para manejar con una fuente independiente el motor del cabestrante.

En la “Electrónica de recolección” se encuentran los componentes utilizados para la automatización de la recolección de muestras. Los componentes utilizados se usaron para diferentes funciones: para la activación de los mecanismos de activación de las botellas Niskin (motor a pasos), para obtención de los parámetros del agua (sonda multiparámetro). En ambos componentes era necesario que las instrucciones o comandos que se reciban o envíen debían cumplir el protocolo RS485 que es el usado para comunicarse con el embebido de la superficie. Debido a esta necesidad de tener una comunicación que cumpla con el protocolo en mención, el controlador del motor a pasos se escogió para soportar este y la sonda usa un convertidor de RS485 a RS232.

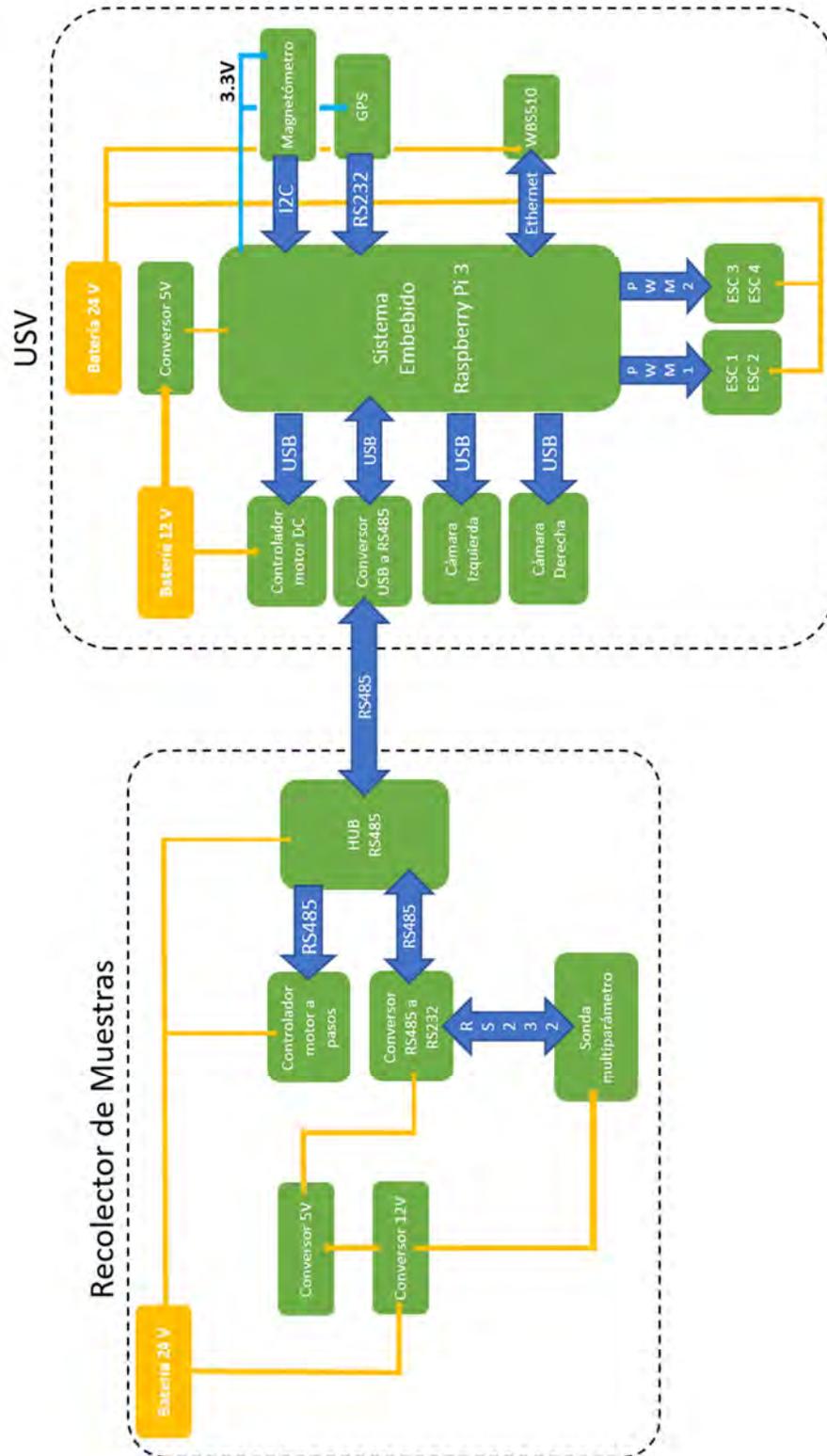


Figura 2.37. Diagrama de bloques del sistema electrónico.

Fuente: Propia.

A continuación, se explicara detalladamente los esquemáticos realizados para el diseño del sistema electrónico; se comenzará con la tarjeta de alimentación para la electrónica de superficie. Esta tarjeta lo que hace es realizar las conexiones en paralelo y en serie de las batería, asimismo regula el voltaje a 24 V para alimentar el router para la comunicación inalámbrica.

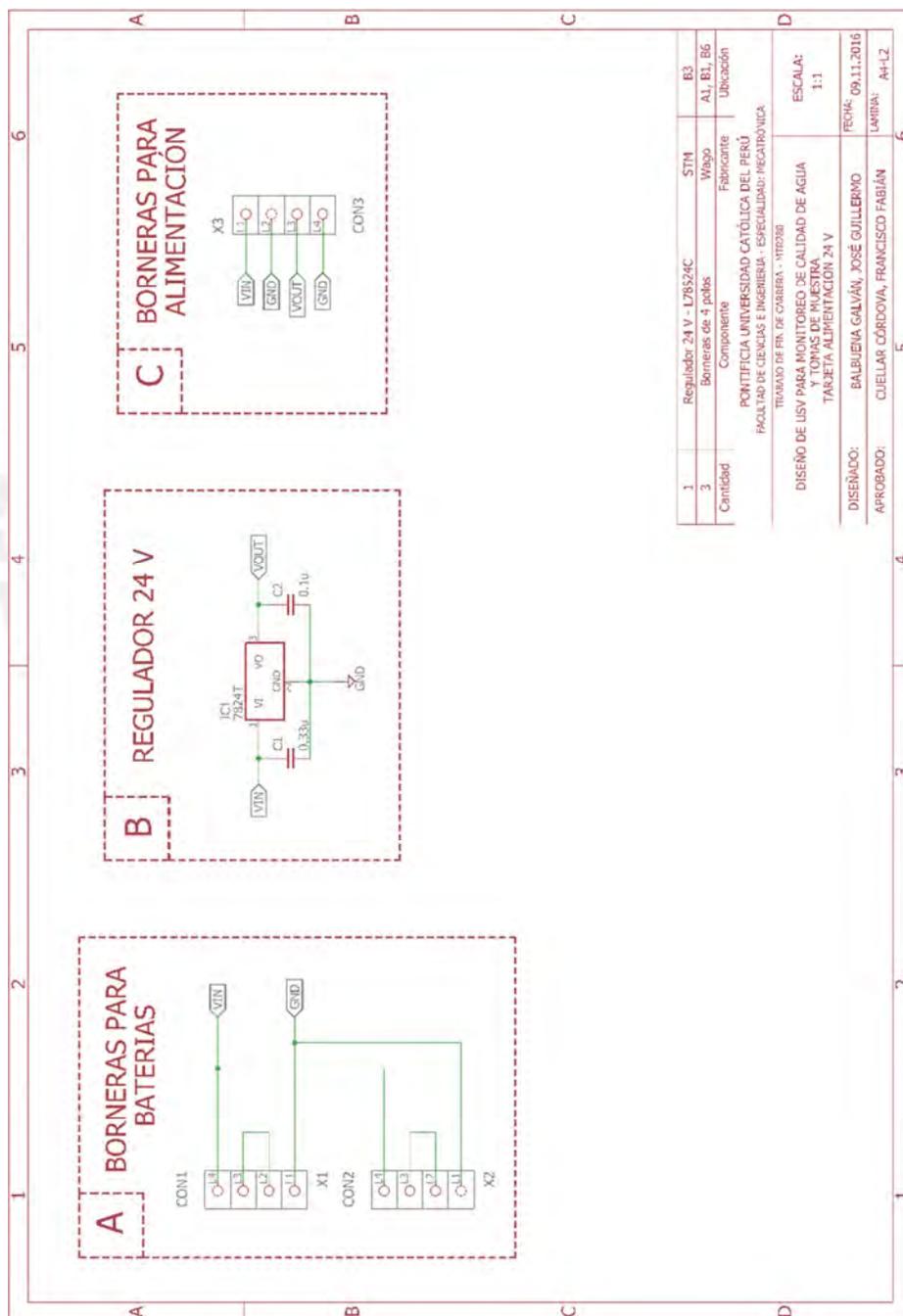


Figura 2.38. Esquemático de la tarjeta de alimentación.
Fuente: Propia.

Para la conexión de las baterías a la tarjeta se usaran unas borneras de 4 polos, estas pueden soportar hasta 45 A, que es la máxima corriente que va a entregar la tarjeta de alimentación para los propulsores. Las borneras que se seleccionaron se ajustan con botones, para facilitar la conexión. En la entrada son 2 borneras para las 4 baterías y en la salida es 1 bornera que brinda los 30.8 VDC del conjunto y 24 VDC fijos.



Figura 2.39. Borneras para la batería y la salida de la tarjeta de alimentación.
Fuente: Propia.

El siguiente componente de la tarjeta de alimentación, es el regulador de 24 VDC fijo, que servirá para la alimentación del adaptador POE del router inalámbrico; el modelo del regulador es el L7824C con su respectivo disipador de calor, este se escogió debido a que soporta como voltaje de entrada desde 27 VDC hasta 40 VDC y puede entregar hasta 2 A. Estas características permiten alimentar el router correctamente; debido a que este funciona a 1 A y el conjunto de baterías llega hasta 30.4 VDC cuando están cargadas en su totalidad, por recomendación del fabricante se colocan 2 condensadores de 0.33 y 0.1 μF para reducir el voltaje de rizado a la salida.

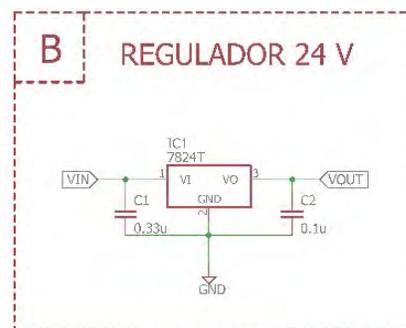


Figura 2.40. Borneras para la batería y la salida de la tarjeta de alimentación.
Fuente: Propia.

El siguiente esquemático que se explicara es el que contiene los componentes que van conectados al embebido en la tarjeta, este no contempla las conexiones que se realizan por USB, en la Figura 2.41 se puede apreciar todo el esquemático.

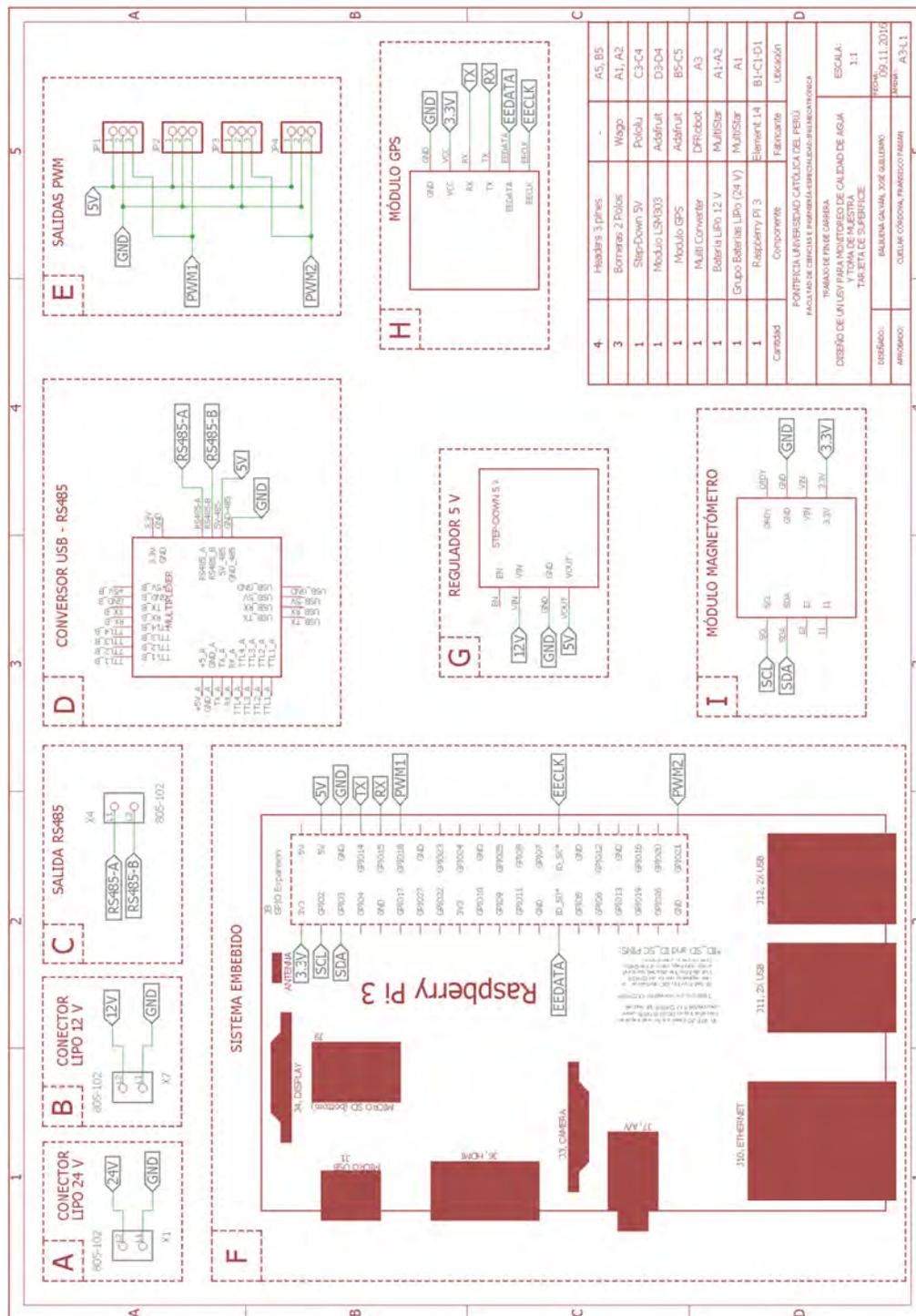


Figura 2.41. Esquemático de la tarjeta en la superficie.
Fuente: Propia.

El primer componente del esquemático de la tarjeta de superficie, es la bornera de 2 polos que permite alimentar la tarjeta con una batería LiPo de 4S que nos da un máximo de 15.2 V cuando está totalmente cargada, las borneras son de la misma marca de la tarjeta de alimentación; pero esta es de solo 2 polos. En la Figura 2.42 se muestra su representación en el esquemático.

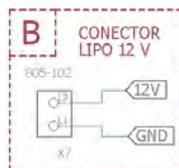


Figura 2.42. Borneras para la batería LiPo 4S.
Fuente: Propia.

El segundo componente es la bornera que sirven para conectar las líneas del cable RS485, que comunicara el USV con el recolector. Esta es la misma que se usa en el conector, la razón es para uniformizar los componentes y facilitar la adquisición.

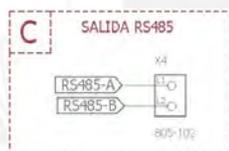


Figura 2.43. Borneras para la comunicación RS-485.
Fuente: Propia.

El tercer componente es el convertor de protocolos, para escoger el convertor se tuvo consideración la diversidad de entradas de comunicación (USB, RS-485 y RS-232); es por este motivo que se escogió un convertor múltiple que permite convertir en distintos tipos de protocolos, en esta tarjeta se usa la conversión USB a RS-485. En la Figura 2.44 se ve las conexiones de este componente.

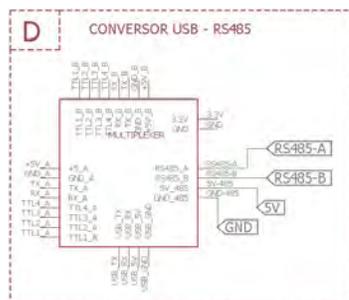


Figura 2.44. Conexiones del convertor múltiple.
Fuente: Propia.

El cuarto componente se encuentra un conjunto de 4 terminales de 3 pines cada uno, que serán los encargados de enviar las señales de control a ESC de los propulsores, esta señales son del tipo PWM. En las conexiones vemos que dos salidas se conectan a una única salida PWM, la razón es que en cada casco hay 2 propulsores y estos deben moverse a la misma velocidad. En la Figura 2.45 se muestra las conexiones a las borneras.

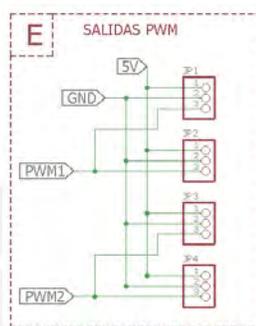


Figura 2.45. Conexiones de las salidas PWM.
Fuente: Propia

El quinto componente es el embebido al que irán conectados los módulos, y en donde se realizara el control de todo el sistema. Como vemos este embebido se alimenta con 5 VDC, se ven las conexiones de las salidas PWM, adicionalmente las conexiones SCL y SDA son para la comunicación I2C del magnetómetro; finalmente las conexiones TX, RX, EEDATA y EECLK son para la conexión del GPS.

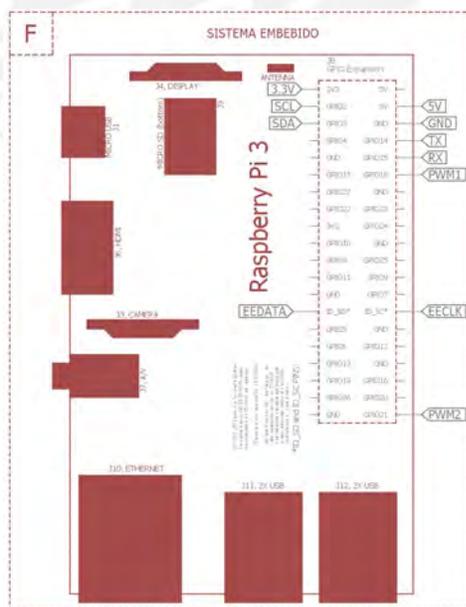


Figura 2.46. Conexiones del Raspberry Pi 3.
Fuente: Propia

El sexto elemento que se encuentra en la tarjeta es el convertidor de 5 VDC, este regulador es el encargado de alimentar a la Raspberry Pi 3, la que a su vez alimenta con 3.3 VDC tanto al módulo GPS como el magnetómetro. Para su selección se tuvo en consideración que debía satisfacer la corriente máxima que absorbe la Raspberry, en la Figura 2.47 se ven las conexiones del regulador.



Figura 2.47. Conexiones del convertidor de 5 VDC
Fuente: Propia

El séptimo componente de esta tarjeta electrónica es el módulo GPS, este es un módulo es montable en la misma Raspberry Pi; es por esto que se decidió mantener su forma de conexión directa. Este mismo módulo trae incorporado un pequeño protoboard en el cual se pueden realizar las conexiones del magnetómetro, de modo que las conexiones sean directas a la Raspberry. En la Figura 2.48 y Figura 2.49 se ven las conexiones que se deben realizar en ambos módulos.

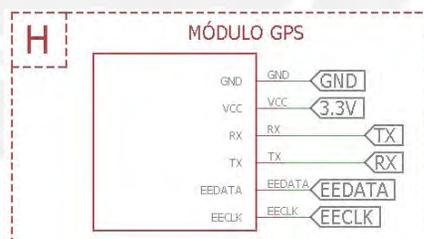


Figura 2.48. Conexiones del módulo GPS.
Fuente: Propia

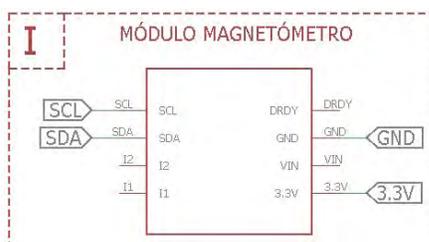


Figura 2.49. Conexiones del magnetómetro.
Fuente: Propia

Una vez concluido la explicación de la electrónica de superficie se pasara a detallar las conexiones de los componentes en el recolector, en la Figura 2.50 se puede ver el esquemático con las conexiones entre los elementos.

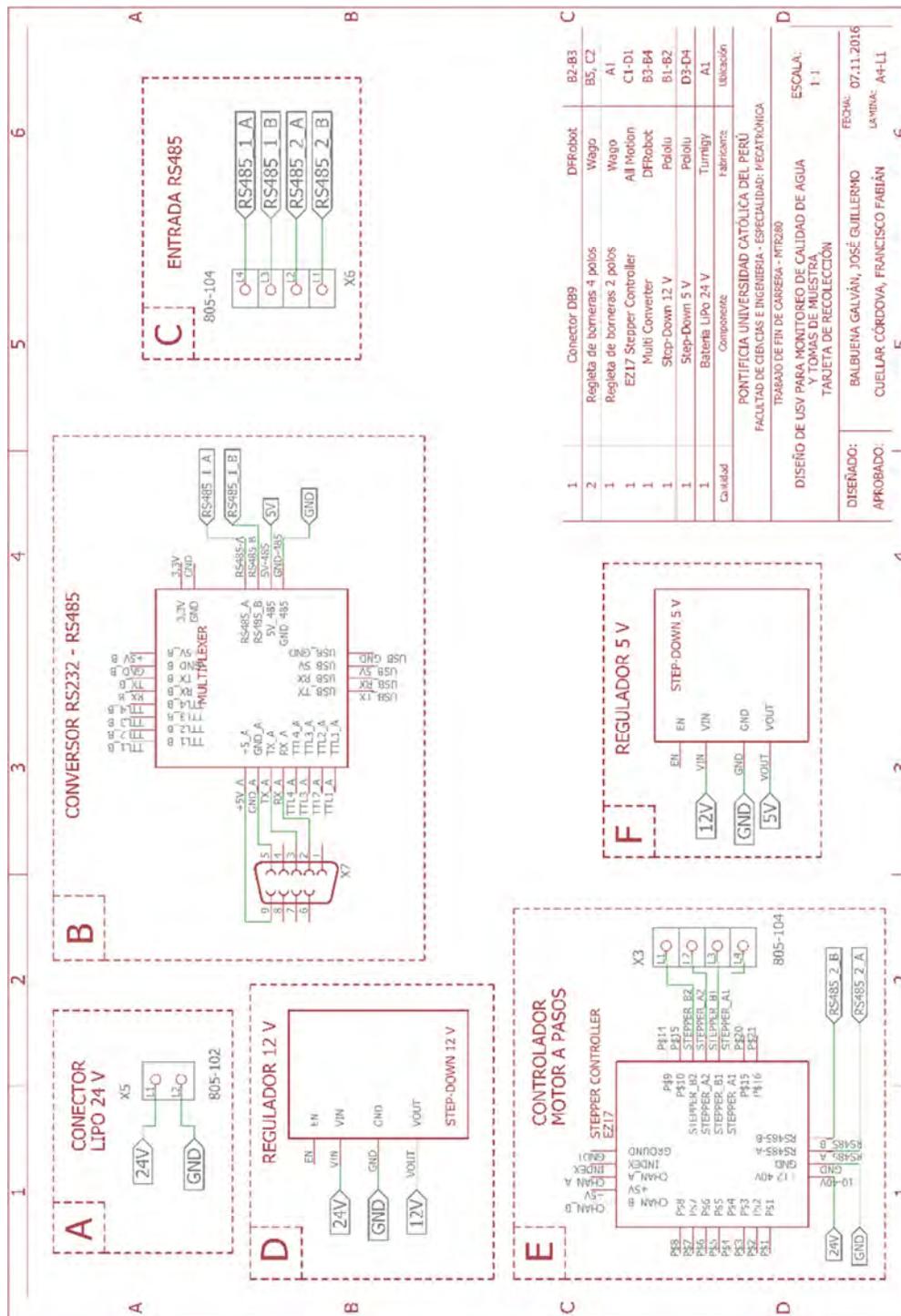


Figura 2.50. Esquemático de la tarjeta en el recolector.
Fuente: Propia.

El primer componente de la electrónica del recolector, es al igual que la superficie las borneras para la conexión de las baterías, siguiendo el principio de anterior de uniformizar las borneras, se escogió la marca WAGO y el tipo CLAMPS de dos polos. En la Figura 2.51 se aprecia la bornera en el esquemático,

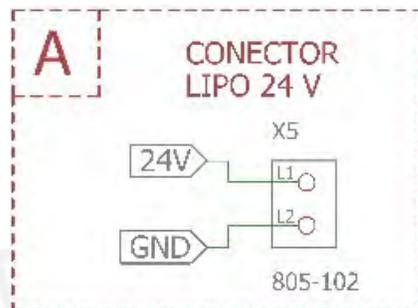


Figura 2.51. Conexión de la batería de 24 VDC mediante borneras.
Fuente: Propia.

El segundo componente es el convertidor, se escogió el mismo convertidor múltiple que se usa en la electrónica de superficie. En este caso la conversión se da entre RS-485 a RS-232 y viceversa para comunicarse con la sonda multiparámetro; en la Figura 2.52 se puede observar que una entrada DB9 para el RS-232 se conecta al convertidor y este se conecta a la entrada RS-485 que viene del HUB RS-485.

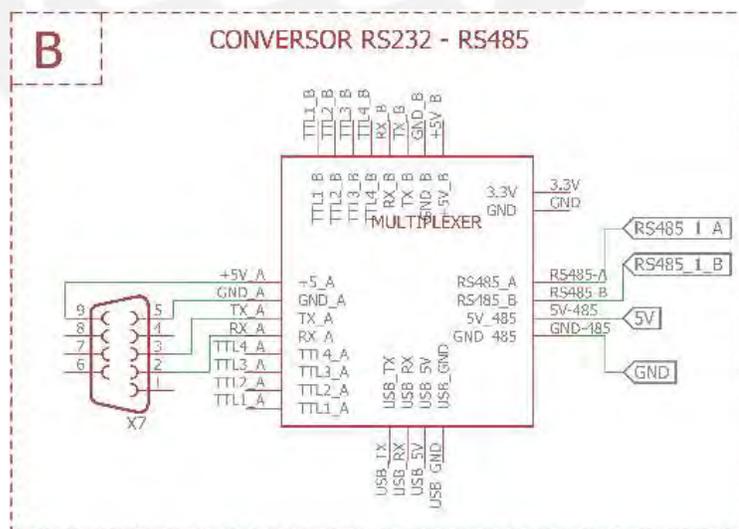


Figura 2.52. Conexión en el convertidor del recolector.
Fuente: Propia.

El tercer componente son las borneras por las cuales ingresan la información enviada desde USV por medio del protocolo RS-485, el cable al llegar al recolector llega a un HUB o repetidor RS-485. Esto permite que la información pueda ser direccionada a cualquiera de los 2 componentes a controlar.



Figura 2.53. Borneras para la conexión de la salida del HUB RS-485.
Fuente: Propia.

El cuarto componente es el regulador de 12 VDC para poder alimentar la sonda multiparametro, adicionalmente este regulador ayuda a reducir el voltaje de entrada que llega al Step-down de 5 VDC para mejorar la eficiencia de este regulador que se explicara más adelante.

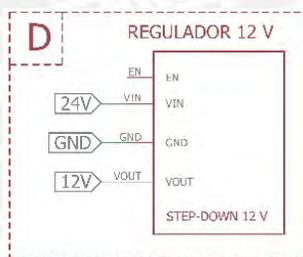


Figura 2.54. Conexiones del regulador de 12 VDC.
Fuente: Propia.

El quinto elemento es el controlador de motor a pasos, este permite poder controlar un motor a pasos con diferentes tipos de entradas y puede entregar hasta 2 A al motor a pasos. Se escogió este por la compatibilidad con el protocolo de comunicación predominante del sistema (RS-485); adicionalmente se ve en la Figura 2.55 se conectan las borneras de 4 polos de la misma empresa que se escogió para los anteriores conexiones y por las mismas razones.

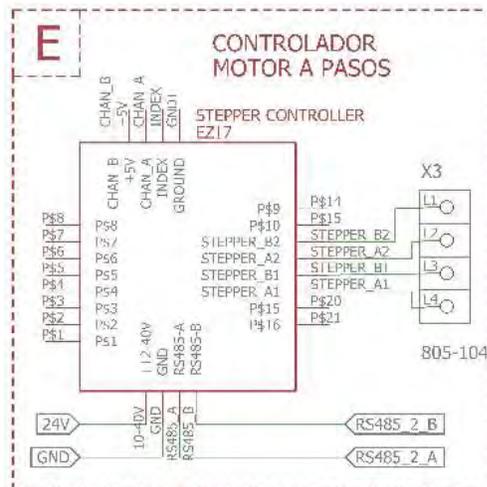


Figura 2.55. Conexiones del controlador del motor a pasos.
Fuente: Propia.

El último componente es el regulador de 5 VDC que se encargara de alimentar el conversor, como se mencionó anteriormente este regulador tiene como entrada el voltaje de 12 VDC para mejorar la eficiencia del regulador (Step-down), en la siguiente sección donde se explica la selección de los componentes se mostraran las gráficas que llevaron a estas conclusiones.

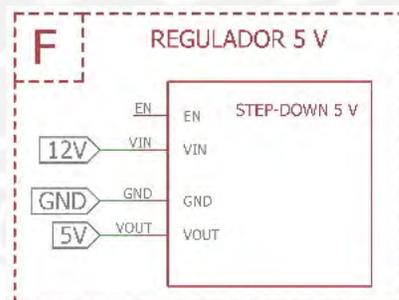


Figura 2.56. Conexiones del regulador de 5 VDC.
Fuente: Propia.

2.3.1 Selección de componentes electrónicos

Continuando con la descripción del sistema electrónico del USV se detallaran los criterios de selección los componentes más importantes; entre ellos se encuentran los elementos de comunicación, los actuadores, los controladores, los sensores de posicionamiento, la sonda multiparametro, los conversores de voltaje y los conversores de comunicación

2.3.1.1 Componentes de comunicación

Para la selección de estos componentes se tuvo como principal consideración dos puntos importantes, el tipo de comunicación inalámbrica, la distancia máxima hasta donde la comunicación es confiable y la facilidad de conexión para el usuario. La comunicación inalámbrica puede ser dividida en distintos grupos según el autor o el libro, para argumentar la selección se tomara la división realizada por Josep Prieto Blázquez [37]. En la Figura 2.57 se puede ver los tres grandes grupos de esta división, el primero WPAN abarca rangos pequeños limitado a espacios como oficinas (10 – 100 m); el segundo WLAN, permite mayor cobertura (200 m – 5 km) y alta transmisión; por último el WWAN que son de gran alcance y permite

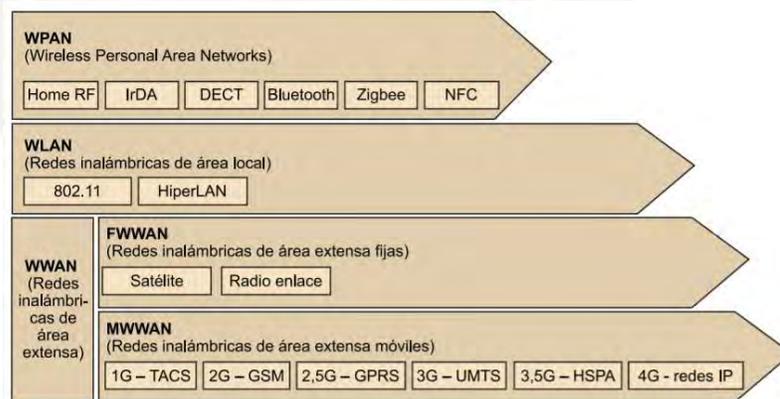


Figura 2.57. Clasificación de las redes inalámbricas.

Fuente: “Introducción a los sistemas de comunicación inalámbricos”

El autor comenta que el WLAN es el que contiene mayor facilidad de instalación y su rango es amplio, estos requisitos cumplen con lo necesario para la comunicación del USV con la estación base; por este motivo se escogió este tipo de comunicación y con el protocolo IEEE 802.11 y se usara una frecuencia de 5GHz debido a que nos da mayor confiabilidad.

Luego de la selección del tipo de comunicación es necesario encontrar los componentes que pueden posibilitar el correcto funcionamiento del WLAN a una larga distancia, lo primero es el dispositivo que permitirá crear la red inalámbrica; en otras palabras será el componente inalámbrico que se quedara en tierra. En la Tabla 2.7 se muestran los distintos tipos routers y estaciones bases que permiten la comunicación.

Tabla 2.7. Tabla de comparación de routers y estaciones base.
Fuente: Propia

Diseño			
Modelo	DIR-809	WBS210	WBS510
Tamaño	190x 133 x 8 mm	198 x 74 x 40 mm	198x75x40 mm
Peso	0.3 Kg	-----	-----
Frecuencia	2.4/5 GHz	2.4 GHz	5 GHz
Protocolo	802.11 a/b/g/n	802.11 a/n	802.11 b/g/n
Velocidad	750 Mbps	300 Mbps	300 Mbps
Máxima distancia	0.2 km	30 km	50 km
Empresa	D-Link	TP-Link	TP-Link
Protección IP	-----	IP65	IP65
Alimentación	----	POE	POE
Alimentación POE	-----	24 VDC @ 1 A	24 VDC @ 1 A
Precio	~ 26 USD	~ 110 USD	~ 110 USD
Fuente	http://www.dlinkla.com	http://www.tp-link.com/	http://www.tp-link.com

Se concluye que para conseguir una gran distancia de comunicación se puede utilizar tanto la WBS510 o la WBS210. La segunda conclusión es que la opción de un router casero (DIR-809) queda descartada por el poco alcance, es decir que el criterio fundamental sería el precio del dispositivo; debido a que ambos dispositivos WBS510 y WBS210 tienen el mismo precio se escoge el WBS510, el cual brinda mayor distancia entre ambos. Este dispositivo necesita, según recomendación de la empresa, un tipo de antena para poder transmitir información del modo PtMP (Punto a Multi-Punto); adicionalmente se necesitara un receptor, ubicado en el USV, que pueda captar la señal correctamente. Ambos, componentes fueron seleccionados siguiendo la

recomendación de la empresa TP-Link, a continuación se mostraran los datos más importantes de estos componentes.

Tabla 2.8. Características de los componentes adicionales al WBS510.
Fuente: Propia

Diseño		
Componente	Punto de acceso	Antena de sector
Modelo	CPE510	ANT58119MS
Tipo	224 x 79 x 60 mm	700×133×57mm
Peso	-----	-----
Frecuencia	5 GHz	5 GHz
Protocolo	802.11 a/n	802.11 b/g/n
Velocidad	300 Mbps	300 Mbps
Máxima distancia	15 km	50 km
Empresa	TP-Link	TP-Link
Protección IP	IPX5	IP65
Alimentación	POE	POE
Alimentación POE	24 VDC @ 1 A	24 VDC @ 1 A
Precio	~ 60 USD	~ 140 USD
Fuente	http://www.tp-link.com/	http://www.tp-link.com

Con los componentes mencionados, se puede lograr y asegurar una comunicación inalámbrica confiable, de larga distancia, de fácil instalación y portable; cumpliendo de la mejor manera la tarea de mantener la conexión del operario con el USV. Para finalizar el complementar la selección del WBS510 como componente encargado de entablar la conexión inalámbrica es que este hace uso de una frecuencia de 5 GHz para la comunicación lo que permite la reducción de interferencias que reducen la velocidad de transmisión; el principal motivo de las interferencias se debe principalmente a que la mayoría de redes inalámbricas usan la frecuencia de 2.4 GHz llegándola a saturar y perder información o no entablar comunicación; el uso de esta frecuencia es permitido para fines de investigación [38]

2.3.1.1 Componentes del USV

En esta sección se explicara los criterios de selección que se tomaron en consideración para la selección de los componentes electrónicos que van a bordo del USV. Entre los componentes que se describirán tenemos los encargados del movimiento, los encargados de la localización del USV, etc.

a) Propulsores

Para la selección de los propulsores se tomaron en consideración los siguientes cálculos en los cuales se determina la fuerza de propulsión (Thrust) necesario para mover el USV, estos nos permitirá determinar la cantidad de propulsores necesarios. Para esto es necesario el DCL del USV que se muestra en la Figura 2.58, se ve que actúan una fuerza de propulsión (F_P) y una fuerza resistente (R_T).

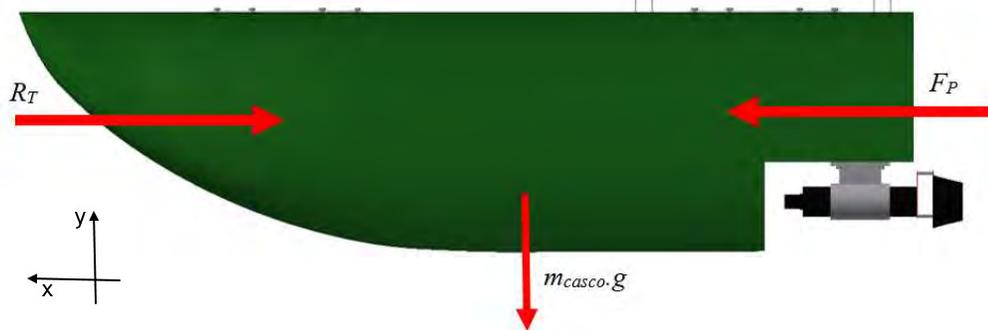


Figura 2.58. Diagrama de cuerpo libre (DCL) del USV.
Fuente: Propia

$$\Sigma F_x = -R_T + N \cdot F_P = (m_{CASCO} + m_{extra}) \cdot a$$

$$F_P = \frac{R_T + m_{TOTAL} \cdot a}{N}$$

De los cálculos realizados en el “Anexo B – Sección I”, se obtiene la gráfica “Velocidad vs. Resistencia del agua R_T ” (Ver Figura 2.59), donde se ve que para la velocidad mínima requerida (1 m/s) la Resistencia del agua es igual a 14.38 N. Adicionalmente, con el peso del USV que es 180 kg y con una aceleración de 0.5 m/s; podemos calcular la fuerza de propulsión necesaria para mover el bote:

$$F_P = \frac{R_T + m_{TOTAL} \cdot a}{N} = \frac{14.38 + 180 \cdot 0.5}{N} = \frac{104.38}{N}$$

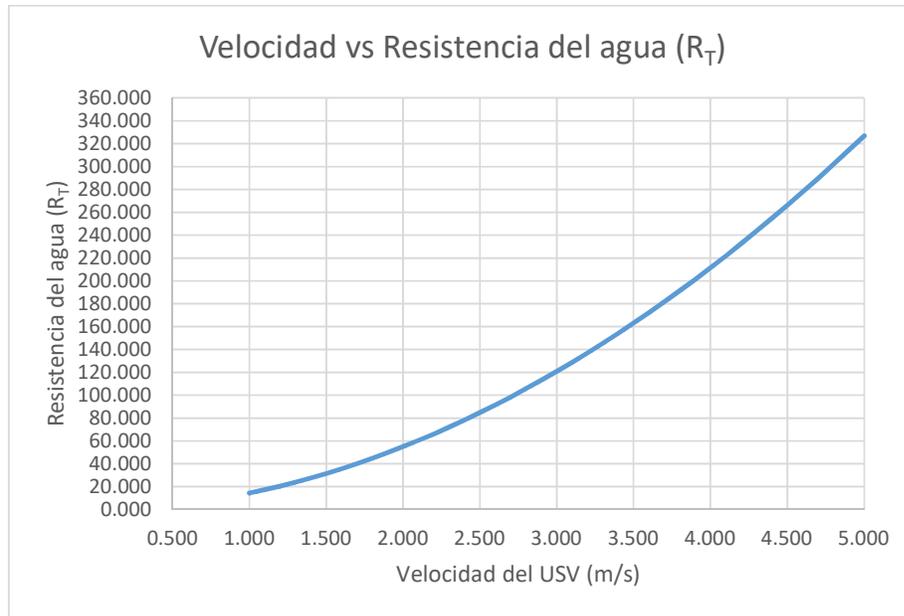


Figura 2.59. Gráfica Velocidad vs. Resistencia del Agua.
Fuente: Propia

Suponiendo que la cantidad de propulsores a utilizar son 4, la fuerza de propulsión dependería de la velocidad (Ver Figura 2.60), esta aumentaría según aumenta la velocidad; asimismo del gráfico podemos ver que para la velocidad mínima requerida (1 m/s) la fuerza de propulsión necesaria es 2.66 kg.

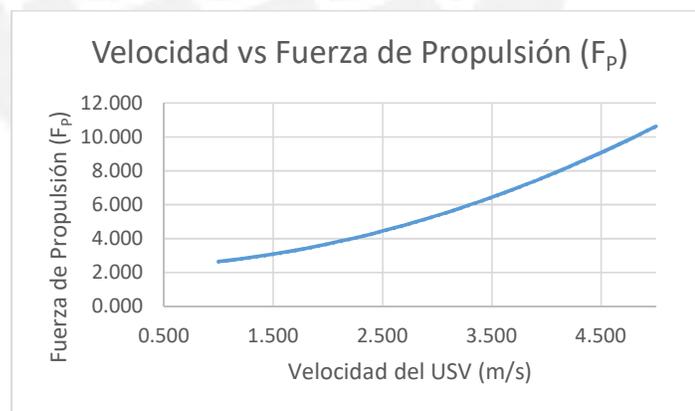


Figura 2.60. Gráfica Velocidad vs. Fuerza de propulsión.
Fuente: Propia

Con el cálculo anterior queda sustentado que para mover el USV a 1 m/s es necesario un mínimo de 2.7 kgf, por otro lado, es de importancia el tamaño, el peso, la forma de sujeción y las formas de control que posee el propulsor; en esta última característica es deseable que se puedan controlar usando PWM (Pulse Width Modulation) debido a

la facilidad de implementación. En la Tabla 2.9 se muestra un resumen de las principales características de los propulsores tomados en consideración para la propulsión del USV.

Tabla 2.9. Principales características de los propulsores analizados.
Fuente: Propia

Diseño			
Modelo	SI-MCT01	HF 600	
Tamaño	193 x 221 x 337 mm	300 x 80 x 80 mm	212.6 x 190 x 190 mm
Peso	4.3 kg	0.9 kg	2.8 kg
Señales de control	RS-485	ESC (PWM)	RS485
Voltaje nominal	48 VDC	12 – 50 VDC	48 – 250 VDC
Corriente Nominal	6 A	----	1.65 A @ 300 VDC
Potencia	300 W	130 – 150 W	-----
Empuje	13 kgf @ 300 W	7.3 kgf @ 24 VDC	12.5 kgf
Material del hélice	Plástico	Bronce	Acero inoxidable
Empresa	SAAB SEAEYE Ltd.	CRUSTCRAWLER	DWTEK
Precio	----	~ 980 USD	-----
Fuente	www.seaeye.com/	www.crustcrawler.com	www.dwtekmarine.com

Del cuadro se observa que todos los propulsores pueden dar la fuerza, pero el propulsor que mejor se acomoda a las necesidades del sistema es el HF600, sobre todo por el control que se realiza mediante el ESC que permite controlar la velocidad por medio del ancho de pulso. Adicionalmente, el rango de voltaje con el cual este propulsor funciona es menor y el tamaño es menor que las otras dos opciones. Para la selección del controlador del propulsor se optó por utilizar un ESC (Electronic Speed Controller), siguiendo las recomendaciones del fabricante. Este nos propone el uso del ESC “Phoenix EDGE HV60” de la empresa “Castle Creations”; el componente en mención cuenta con un sistema de control incorporado que necesita un firmware el cual bien incluido en el ESC. En la Tabla 2.10 se puede apreciar el resumen de las principales características del componente seleccionado para el control de los propulsores.

Tabla 2.10. Características Phoenix EDGE HV60.
Fuente: <http://www.castlecreations.com/>

Propiedad	Valor
Dimensiones	50.8 x 76.2 x 23.2 mm
Peso	0.125 kg
Voltaje de Entrada	3S – 12S LiPo
Corriente máxima	60 A
Voltaje máximo	50 V
Capacidad de telemetría	Si
Precio	~ 121 USD



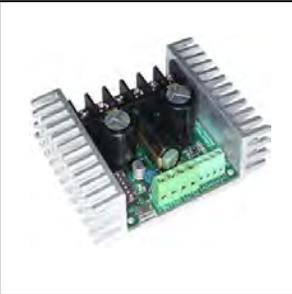
Figura 2.61. Phoenix EDGE HV60.
Fuente: <http://www.castlecreations.com/>

Una de las mayores ventajas de usar este ESC es la separación de la electrónica de potencia con la electrónica de control; esta propiedad permite aislar el sistema electrónico de control con el de potencia evitando posibles desperfectos causados por picos de corriente en el propulsor o algún cortocircuito interno que puede ocurrir en los propulsores durante el uso del USV.

b) Controlador motor DC del cabestrante

Como se definió en el sistema mecánico, el mecanismo de ascenso – descenso es activado por un motor DC que viene incorporado con el cabestrante seleccionado. Son las especificaciones para el funcionamiento de este actuador los que determinan los criterios de selección usados para el controlador. Entre las especificaciones principales se encuentran el voltaje (12 V) y la corriente máxima (50 A); adicionalmente la señal de control de este dispositivo debe ser manejable por el embebido (USB, PWM, RS232, etc.).

Tabla 2.11. Características de los controladores de motor DC.
Fuente: Propia.

Diseño			
Modelo	G2 High Power	Roboclaw 2x60 A	Sabertooth 2x32A
Tamaño	1.3" x 0.8"	3.4" x 3.9" x 1.4"	2.75" x 3.5" x 1.0 "
Peso	5.0 g	205 g	125 g
Señales de control	PWM	USB, TTL, analógico, PWM	USB, TTL, analógico
Voltaje de operación	6.5 – 30 VDC	6 – 34 VDC	6 – 30 VDC
Corriente Nominal	25 A	60 A	32 A
Protección para batería	Si	Si	Si
Cantidad de canales	1	2	2
Empresa	Pololu	Ion Motion Control	RobotShop Inc.
Precio	~ 40 USD	~ 200 USD	~ 125 USD
Fuente	www.pololu.com	www.ionmc.com	www.robotshop.com/

De la tabla resumen podemos observar que de los controladores evaluados el único que puede cumplir las necesidades del motor DC del cabestrante es el Roboclaw 2x60 A, este controlador contiene 2 canales y en cada uno puede soportar hasta 60 A. La señal de control de este dispositivo es de diferentes tipos (USB, RS232, PWM, analógico), de las cuales tanto el USB como el PWM son compatibles con la mayoría de sistemas embebidos. El controlador puede ser configurado mediante los botones que se encuentran en la tarjeta para escoger el tipo de señal de control.

c) Sensores de posicionamiento

En esta sección se detallarán los componentes seleccionados para el posicionamiento y direccionamiento del USV, ambos son necesarios para ayudar al operario a saber por dónde se encuentra el vehículo. Para el direccionamiento es necesario saber la inclinación respecto a su posición inicial y también el operario debe tener un modo de visualizar por donde está dirigiendo al USV; esto se puede lograr mediante el uso de un magnetómetro y un grupo de cámaras. Para el posicionamiento es necesario conocer la posición en la que se encuentra, esto se puede lograr mediante un GPS que nos brinda la longitud y latitud en la que se encuentra el sistema.

El primer componente en seleccionar es el magnetómetro para el que se tuvieron en consideración distintos tipos, por lo general estos sensores se comunican por medio de I2C; por este motivo el tipo de comunicación no es un factor relevante.

Tabla 2.12. Principales características de los magnetómetros analizados.

Fuente: Propia

Diseño			
Modelo	LSM303 Board	MAG3110	HMC64343 Breakout
Tamaño	20.3 x 22.9 mm	13.3 x 14.5 mm	9 x 9 mm
Peso	-----	-----	0.32 g
Voltaje de alimentación	2.1 -3.6 VDC	1.95 – 3.6 VDC	3.3 VDC
Corriente Nominal	110 μ A	900 μ A	4.5 mA
Rango	$\pm 1.3 - \pm 8.1$ gauss	± 10 gauss	± 1 gauss
Resolución	16 bits	7 bits	-----
Temperatura	-40 – 85 °C	-40 – 85 °C	-40 – 80 °C
Empresa	Adafruit	Sparkfun	Sparkfun
Precio	~ 15 USD	~ 15 USD	~ 150 USD
Fuente	www.adafruit.com	www.sparkfun.com	www.sparkfun.com

Debido a las necesidades del sistema las dos mejores opciones son el LSM303 y el MAG3110, ambos tienen un amplio rango de trabajo. El factor determinante en la selección del LSM303 es el consumo, puesto que este sensor irá conectado al embebido y conviene que el consumo sea el mínimo.

El siguiente componente que permite el direccionamiento del USV son las cámaras, estas necesitan una resolución alta debido a que es el medio por el cual el operario puede observar el entorno por donde moverá el vehículo, por lo tanto la resolución es importante. Adicionalmente, es importante que se pueda conectar por medio de USB debido a que es una conexión simple y este tipo de entradas son comunes en los diferentes sistemas embebidos que existen en el mercado. En la Tabla 2.13 se muestran las diferentes cámaras que se tomaron en consideración al momento de la selección.

Tabla 2.13. Principales características de las cámaras analizadas.
Fuente: Propia

Diseño			
Modelo	HD Pro Webcam C922	ELP-USBFHD01M-BL36	LifeCam HD-3000
Tamaño	29 x 24 mm	32 x 32 mm	109 x 44,5 mm
Peso	162 g	-----	90 g
Voltaje de alimentación	5 VDC	5 VDC	5 VDC
Corriente Nominal	----	150 mA	-----
Conexión	USB 2.0	USB 2.0	USB 2.0
Resolución	1920 x 1080 2 Mpx	1920 x 1080 2 Mpx	1280x720 0.9 Mpx
Temperatura	----	-20 – 70 °C	0 – 40 °C
Protección	----	-----	-----
Empresa	Logitech	Ailipu Technology	Microsoft
Precio	~ 80 USD	~ 37 USD	~ 27 USD
Fuente	www.logitech.com	www.elpcctv.com	www.microsoft.com

Debido a que la necesidad del sistema es contar con una alta resolución la cámara de Microsoft queda descartada, por lo que el factor determinante en esta selección va a ser el precio ya que comparten las mismas características. Teniendo en cuenta el precio la mejor opción para la cámara sería la ELP, adicionalmente en esta cámara el fabricante asegura que la el componente trabajara a temperaturas menores a 0 °C que son temperaturas comunes en los lagos que se encuentran en las alturas del país. Otro factor importante para la selección de esta cámara es que brindaba información del consumo eléctrico y cuenta con un soporte en el cual puede posicionarse un tornillo para fijarlo al USV.

Por último, para el posicionamiento del móvil se utilizara un GPS; este dispositivo nos permite saber la ubicación del USV en términos de latitud y longitud. Los criterios de selección de este sensor es en primer lugar la precisión y la rapidez con la cual puede obtener la posición, para lograr esto son necesarias dos características: el número de canales que cuenta el GPS y la frecuencia de actualización del mismo. El número de canales nos indica cuantos satélites puede buscar para localizarse; y la frecuencia de actualización nos indica cuantas veces actualiza su posición por ciclo. En la Tabla 2.14 se puede observar las características de los distintos módulos analizados

Tabla 2.14. Principales características de los GPS analizados.

Fuente: Propia

Diseño			
Modelo	GPS HAT	Venus GPS	Copernicus II DIP
Tamaño	65 x 56 x 7 mm	29 x 18 mm	28 x 32 mm
Peso	----	-----	-----
Voltaje de alimentación	3.0 – 4.3 VDC	2.7 – 3.3 VDC	2.7 – 3.3 VDC
Corriente Nominal	25 mA	16 mA	44 mA
Número de canales	66	65	12
Frecuencia de actualización	10 Hz	20 Hz	1 Hz
Precisión	1 m	2.5 m	2.5 m
Temperatura	-40 – 85 °C	-40 – 85 °C	-40 – 85 °C
Empresa	Adafruit	Sparkfun	Sparkfun
Precio	~ 45 USD	~ 45 USD	~ 75 USD
Fuente	www.adafruit.com	www.sparkfun.com	www.sparkfun.com

En base las características necesarias, el modelo seleccionado es el GPS HAT de la empresa “Adafruit”, este módulo GPS posee 66 canales lo que le permite obtener su posición del satélite que este más accesible al analizar varios a la vez. La frecuencia es de 10 Hz lo que significa que el GPS recalculara su posición 10 veces por segundo, lo que es muchas veces requerido por los vehículos no tripulados. Adicionalmente, este módulo es compatible con el sistema embebido “Raspberry Pi 3” y cuenta con un protoboard soldable para poder agregar otros módulos.

d) Sistema Embebido

El sistema embebido es el cerebro del USV, es por este motivo que su correcta selección es de suma importancia y existen diferentes características que son primordiales para el proyecto. Lo primero es la frecuencia y la memoria RAM del embebido, a una mayor frecuencia acelera los procesos; la segunda característica es la cantidad de entradas USB que posee, debido a que diferentes dispositivos (cámaras, controladores, etc.) usan este tipo de entradas; y finalmente la cantidad de pines de propósito general (GPIO) que posee, este permite diferentes interfaces (PWM, I2C, etc.).

Tabla 2.15. Principales características de los embebidos analizados.

Fuente: Propia

Diseño			
Modelo	Raspberry Pi 3	Beaglebone Black	pcDuino Lite
Tamaño	85 x 49 mm	54 x 86 mm	125 x 52 mm
Peso	45 g	39.7 g	-----
Voltaje de alimentación	5 VDC	5 VDC	5 VDC
Corriente Nominal	2.5 A	1 A	2 A
Cantidad de puertos USB	4	1	1
CPU	1.2 GHz 64 bits quad-core ARMv8	AM335x 1GHz ARM Cortex-A8	1 GHz ARM Cortex A8
Numero de pines (GPIO)	40	92	32
Capacidad	-----	4 GB 8-bit eMMC	-----
RAM	1 GB	512 MB	512 MB
Empresa	Raspberry Pi Co.	Beaglebone	LinkSprite
Precio	~ 35 USD	~ 55 USD	~ 30 USD
Fuente	www.raspberrypi.org	beagleboard.org	store.linksprite.com

De acuerdo a las características deseadas el embebido seleccionado es el Raspberry Pi 3, debido a que posee una frecuencia de 1.2 GHz y una RAM de 1 GB; asimismo la cantidad de entradas USB que posee el embebido es mayor que las otras dos opciones, tiene 4 entradas que servirán para las 2 cámaras, el controlador del motor DC y la sonda multiparámetro. Adicionalmente, algunos de los módulos que se han seleccionado son compatibles con este embebido, como el GPS y existen diferentes tipos de bibliografías desarrolladas para el uso de este embebido con los módulos.

2.3.1.2 Componentes del Recolector de muestras

En esta sección se detallaran los criterios de selección usados para escoger los principales componentes del recolector de muestras, estos son el motor a pasos y la sonda multiparámetro. El motor a pasos cumple la función del accionamiento de recolector de muestras y la sonda multiparámetro que permite la obtención de los parámetros físico - químicos

a) Motor a pasos

Para la selección del motor a pasos fueron importantes las siguientes características: primero que tenga el torque mínimo necesario para el accionamiento, esta se encuentra calculada en el “Anexo B – Sección I” y trabajar a una velocidad mínima; la segunda característica es poder trabajar debajo del agua y finalmente trabajar a un voltaje accesible para usar batería LiPo. En la Tabla 2.16 se resumen las características mecánicas que debe poseer el motor según los cálculos y en la Tabla 2.17 las características de los motores analizados.

Tabla 2.16. Principales características de los motores a pasos analizados.

Fuente: Propia

Característica	Valor
Torque	0.15 N.m
Velocidad	1 RPS
Potencia	~ 1 W

Tabla 2.17. Principales características de los motores a pasos analizados.

Fuente: Propia

Diseño			
Modelo	WP-U21	5718X – 01S	23L65004S-LW4
Tamaño	72 x 114 mm	57 x 65 mm	57 x 65 mm
Peso	2.55 kg	0.5 kg	0.5 kg
Voltaje de alimentación	12 – 150 VDC	24 VDC	24 VDC
Potencia	10 W	35 W	48 W
Protección IP	----	IP67	IP65
Profundidad de trabajo	305 m	1 m	No sumergible
Torque	0.21 N.m @ 24 VDC	0.43 N.m @ 24 VDC	0.5 N.m @ 24 VDC
Velocidad	1 RPS @ 24 VDC	5 RPS @ 24 VDC	-----
Empresa	Empire Magnetics	Lin Engineering	Anaheim Automation
Precio	~ 3000 USD	~ 70 USD	~ 300 USD
Fuente	www.empiremagnetics.com	www.linmotors.com	anaheimautomation.com

Según los criterios antes mencionados el único motor a pasos que cumple con la especificación de trabajar bajo el agua es el WP-U21 de la empresa “Empire Magnetics”, este motor puede trabajar hasta una profundidad de 300 m aproximadamente, adicionalmente brinda el torque y potencia necesario para el accionamiento del recolector de muestras. Para controlar este motor, la empresa sugiere el uso del controlador EZ17 de la empresa “All Motion”, este controlador tiene la ventaja de poder ser operado mediante la comunicación RS485 que es la utilizada para la comunicación entre el USV y el recolector y que soporta la corriente y voltaje del motor a pasos seleccionado. En la Figura 2.62 se muestra el controlador EZ17 y en la Tabla 2.18 se resumen sus principales características.

Tabla 2.18. Características Controlador EZ17

Fuente: <http://www.allmotion.com/>

Propiedad	Valor
Voltaje de entrada	10 - 40 VDC
Corriente de entrada	2 A
Frecuencia	4 MHz
Comunicación	RS232, RS485, USB
Tamaño	40 x 40 mm
Tipo de motor	NEMA 23
Resolución de paso	1/2 hasta 1/156 del paso
Temperatura	-20 – 85 °C
Posibilidad de incluir encoder	Si



Figura 2.62. Controlador EZ17.

Fuente: <http://www.allmotion.com/>

b) Sonda Multiparametro

Para la sonda el criterio principal de selección es el rango de trabajo de los sensores, así como la precisión de los sensores que lo componen; estos deben cumplir con los requerimientos sistema que fueron descritos con anterioridad. En la Tabla 2.19 se muestra el resumen de las características de las sondas multiparametro analizadas.

Tabla 2.19. Principales características de las sondas multiparametro analizadas.

Fuente: Propia

Diseño				
Modelo	Manta Sub2	6820 V2-2	Aquaread AP 2000	
Tamaño	49.5 x 406 mm	73 x 343 mm	42 x 290 mm	
Peso	1.1 kg	1.5 kg	0.7 kg	
Voltaje Nominal	12 VDC	12 VDC	12 VDC	
Corriente Nominal	200 mA	200 mA	150 mA	
Comunicación	RS232	RS232	RS232	
Temperatura de operación	-5 – 50 °C	-5 - 50°C	-5 – 70 °C	
Máxima profundidad	200 m	61 m	60 m	
Sensores				
pH	<i>Rango</i>	0 – 14 uu	0 – 14 uu	0 – 14 uu
	<i>Resolución</i>	0.01 uu	0.01 uu	0.01 uu
	<i>Precisión</i>	± 0.1 uu	± 0.2 uu	± 0.1 uu
Oxígeno Disuelto	<i>Rango</i>	0 – 30 mg/l	0 – 50 mg/l	0 – 50 mg/l
	<i>Resolución</i>	0.1 mg/l	0.01 mg/l	0.01 mg/l
	<i>Precisión</i>	± 10 %	± 15 %	± 10 %
Conduc.	<i>Rango</i>	0 – 275 mS/cm	0 – 100 mS/cm	0 – 200 mS/cm
	<i>Resolución</i>	4 dígitos	0.001 – 0.1 mS/cm	4 dígitos
	<i>Precisión</i>	±1 %	±0.5 %	±1 %
Temp.	<i>Rango</i>	-5 – 50 °C	-5 – 50 °C	-5 – 50 °C
	<i>Resolución</i>	0.01 °C	0.01 °C	0.01 °C
	<i>Precisión</i>	± 0.1 °C	± 0.15 °C	± 0.5 °C
Prof.	<i>Rango</i>	0 – 100 m	0 – 200 m	0 – 60 m
	<i>Resolución</i>	0.01 m	0.001 m	0.01 m
	<i>Precisión</i>	± 0.05 m	± 0.3 m	±0.5 %
Empresa	Eureka Water Probes	YSI Incorporated	Aquaread Ltd.	
Fuente	www.waterprobes.com	www.yisi.com	www.aquaread.com	

Siguiendo los criterios de selección la sonda más adecuada es la “Manta Sub 2” que posee mejor precisión en la mayoría de los sensores, así mismo es el único que cumple con la precisión del sensor de profundidad que se menciona en los requerimientos del sistema.

2.3.2 Alimentación del Sistema

En esta sección la selección de la alimentación que tendrá el sistema en general, en primer lugar será la determinar el tipo de baterías que se utilizaran y luego se determinara la forma de entregar energía al recolector de muestras.

En primer lugar se definió el uso de energía eléctrica para el funcionamiento del USV, esto se lograría mediante el uso de baterías; por este motivo el primer punto es escoger el tipo de batería que se utilizaran. Para empezar se eliminó de la selección las batería plomo-acido debido a que es altamente contaminante y el peso es muy alto comparado con la cantidad de carga que puede brindar. El segundo tipo de batería es ser eliminado de las opciones es la batería Ni-Cd (Níquel - Cadmio), esto debido a que poseen el “efecto memoria” que afecta el proceso de descarga; este se acelera después de cada descarga. Por último la batería que parece más apropiada para el trabajo serían las baterías LiPo (Litio Polímero), estas tiene una alta densidad de carga por menor peso; el inconveniente más grande del uso de estas baterías es que no deben descargarse debajo del valor recomendado por el fabricante (usualmente 3.0 V), así mismo su trato debe ser delicado evitando choques bruscos con la batería. A pesar de los problemas que presentan las baterías LiPo, estos pueden ser solucionados mediante el uso de un medidor y acomodando correctamente la batería en un compartimiento seguro.

El segundo punto a tratar es como alimentar el recolector de muestras, la primera opción es tener la fuente de energía en la superficie y la segunda es usar alimentación independiente. El inconveniente con tener toda la fuente de energía en la superficie es que para la transmisión será necesario el uso de cables de largas longitudes, lo que genera una pérdida de voltaje por la resistencia interna del material conductor y podría afectar la eficiencia del motor a pasos que será alimentado en la Figura 2.63 se puede ver como se ve afectado el torque y la velocidad del motor a pasos si se un menor voltaje; es por este motivo que esta opción queda descartada.

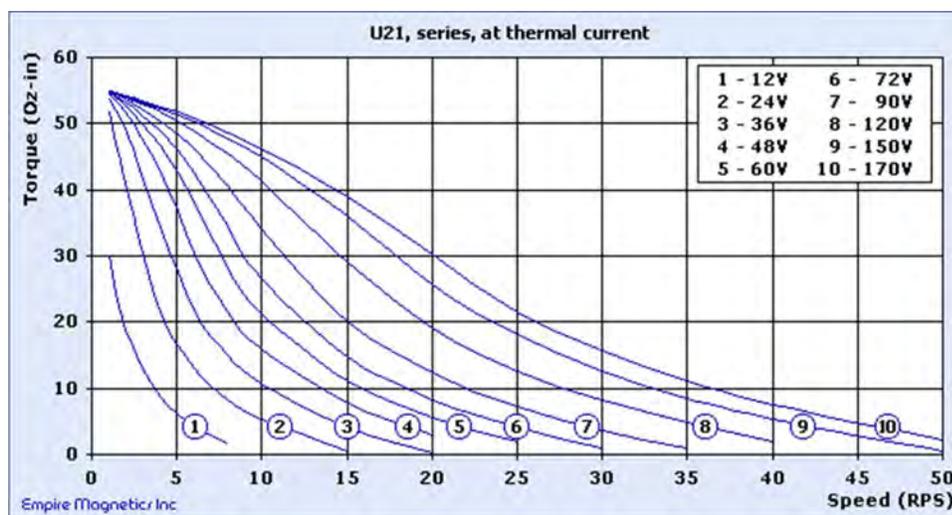


Figura 2.63. Gráfica Torque – Velocidad del motor a pasos WP-U21.

Fuente: <http://www.empiremagnetics.com/>

La explicación anterior nos deja con la opción dos que es el uso de fuentes de alimentación independientes para cada parte del sistema; es decir existirá una fuente de alimentación para los componentes que se encuentren en la parte superior del sistema (propulsores, motor, etc.) y otra distinta para los componentes que se encuentren en el recolector (motor a pasos, sonda multiparámetro, etc.). Un punto importante a recalcar es que en el USV también se consideró el uso de una alimentación independiente para el motor DC del cabestrante, debido a que posee un alto consumo de corriente para los 12 VDC de operación.

El siguiente punto es determinar la cantidad de batería a utilizar para estos se realizaron los cálculos que se pueden observar en el “Anexo B – Sección II”, de los cálculos se determinó que los requisitos mínimos de corriente para que el sistema funcione por lo menos una hora; estos se encuentran resumidos en la Tabla 2.20.

Tabla 2.20. Características mínimas de las baterías del sistema.

Fuente: Propia.

	Voltaje (V)	Corriente (mA.h)
Batería USV	24	14500
Batería Motor DC	12	7410
Batería del recolector de muestras	24	890

Para el USV se utilizó un conjunto de baterías LiPo 4S, las características de estas batería se puede apreciar en la Tabla 2.21; para lograr el voltaje deseado se usa un

conjunto de baterías. Primero se conectan 2 baterías en serie, dos grupos de estos se conectan en paralelo llegando a un voltaje de 30.4 V a 20000 mAh. Este voltaje puede ir directamente a los propulsores, debido a que trabajan en un rango de 12 -48 V; pero no directamente al router que trabaja a 24 VDC para esto se usa un regulador solo para alimentar el router. En la Figura 2.64 se puede ver la batería utilizada.

Tabla 2.21. Características LiPo 4S Turnigy.

Fuente: <http://www.hobbyking.com/>

Propiedad	Valor
Voltaje	4S / 15.2 V
Corriente	10000 mAh
Tamaño	165 x 69 x 35 mm
Peso	0.794 kg



Figura 2.64. LiPo 4S Turnigy.

Fuente: <http://www.hobbyking.com/>

Para alimentar el motor DC del cabestrante se usa el mismo tipo de batería LiPo, solo que para este solo basta con una sola batería, así mismo se usa un regulador de voltaje de 12 a 5 VDC debido a que esta batería también alimentara a todo los componentes electrónicos de bajo consumo sumado esto es mejor usar el regulador con una entrada de 12 V a la de 24 V, porque al incrementar la caída de potencial el regulador pierde eficiencia en la Figura 2.65 se puede ver cómo va variando la eficiencia de acuerdo al voltaje de entrada del regulador seleccionado, adicionalmente en la Figura 2.66 se ve el regulador seleccionado y en la Tabla 2.22 sus principales características.

Tabla 2.22. Características del regulador D24V50F5.

Fuente: <http://www.pololu.com/>

Propiedad	Valor
Voltaje de entrada	6 - 38 VDC
Voltaje de Salida	5 V
Corriente máxima	5 A
Dimensiones	18 x 20 x 9 mm
Peso	3.0 g

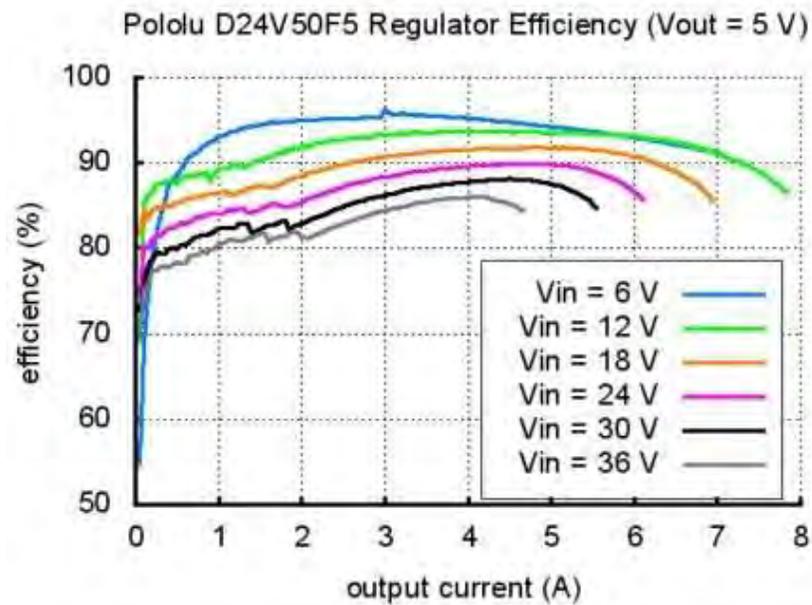


Figura 2.65. Curvas de eficiencia del regulador D24V50F5.
Fuente: <http://www.pololu.com/>

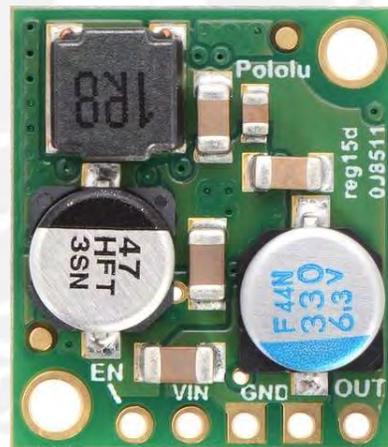


Figura 2.66. Regulador Step-down D24V50F5
Fuente: <http://www.pololu.com/>

Finalmente queda por detallar la batería que será utilizada en el recolector de muestras, esta batería debe tener aproximadamente 24 VDC esto se logra mediante el uso de una batería 6S; en la Tabla 2.23 se muestra las características de la batería seleccionada y en la Figura 2.67 se muestra la batería. Adicionalmente, en este sistema es necesario el uso de 2 reguladores uno para la sonda multiparámetro que trabajo con 12 VDC y otro para 5 VDC; como se explicó anteriormente una gran caída de potencial en el regulador genera una caída en la eficiencia del mismo, por este motivo para llegar a

los 5 VDC se usa como voltaje de entrada el 12 V del primer regulador. Los reguladores step-down usados tienen curvas casi iguales a la mostrada anteriormente y son de la misma empresa “Pololu”.

Tabla 2.23. Características LiPo 6S Turnigy.

Fuente: <http://www.hobbyking.com/>

Propiedad	Valor
Voltaje	6S / 22.2 V
Corriente	2650 mAh
Tamaño	140 x 45 x 35 mm
Peso	0.430 kg



Figura 2.67. LiPo 6S Turnigy.

Fuente: <http://www.hobbyking.com/>

2.4 Sistema de Control

El programa de control del USV, consta de tele operación mediante un web-server, el programa inicia cuando se prende el equipo y se mantiene corriendo hasta que se apague. El procedimiento consiste en que el operario mediante el web server controle el vehículo y acciones remotamente la recolección de muestras; la recolección es automática en el punto en el que el operario ubique el vehículo. El recolecto desciende hasta que el sensor de profundidad le indique que pare, son 6 profundidades fijas a las cuales debe parar. El monitoreo de calidad de agua es continuo, por este motivo los datos de la sonda son constantemente leídos y enviados en tiempo real al web server.

La lógica empleada para el funcionamiento del USV será implementada en el embebido Raspberry Pi 3 y el lenguaje de programación a utilizar será Python. En la Figura 2.68 se muestra el flujo del programa principal, este programa empieza con la inicialización de 2 variables globales que serán de ayuda en todo el flujo; estas son 'Profundidad' y 'Recolección'. La primera variable será para guardar la profundidad a la que se encuentra el recolector y la segunda para saber el momento en que comenzara la recolección de muestras.

Luego de inicializar variables, el programa realiza la configuración inicial de todos los periféricos de la Raspberry Pi 3 que utilizara (Serial, I2C, TCP/IP) y luego hace una primera lectura de los sensores. El siguiente paso es la recepción de los comandos vía sockets que usa el protocolo TCP/IP, con esta información el embebido se pregunta si ya es necesario comenzar la recolección, en ambas situaciones se modificara el PWM y al salir realizara una lectura de todos los sensores y enviara los datos por sockets.

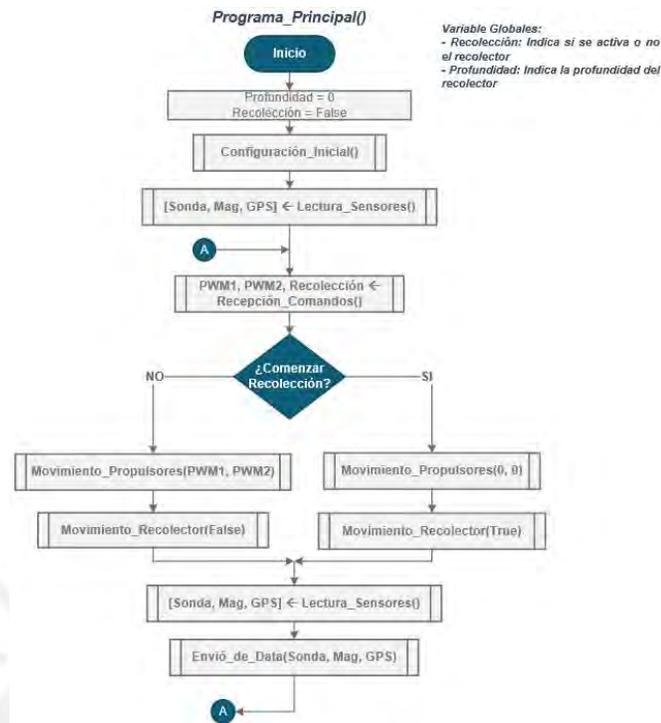


Figura 2.68. Diagrama de Flujo del programa principal.
Fuente: Propia

A continuación se explicaran brevemente las sub-funciones del programa principal. La primera de estas, es la configuración inicial de los periféricos de la Raspberry; los periféricos a utilizar son: 1) Serial 1 - USB, para la comunicación de la sonda con el embebido; 2) Serial 2 – RS232, para la comunicación con el GPS; 3) I²C, para la comunicación con el magnetómetro; 4) Ethernet, para poder comunicarse con dispositivos en LAN y 5) los pines del GPIO (General Purpose Input/Output). El diagrama de la sub-función antes mencionada se encuentra en la Figura 2.69.



Figura 2.69. Diagrama de Flujo de la configuración inicial.
Fuente: Propia

La siguiente sub-función es la recepción de comandos (Ver Figura 2.70); en esta se realiza el leído del socket por donde el usuario envía la información, en Python existe una librería para realizar toda la operación que involucra la decodificación de los datos.



Figura 2.70. Diagrama de Flujo de la recepción de comandos.
Fuente: Propia

Lo siguiente es el describir el comportamiento de la sub-función del movimiento de los propulsores; lo que hace esta sub-función es leer los valores que recibió del socket y varía el ‘duty cycle’, al variar el ciclo de trabajo se controla la velocidad del propulsor.

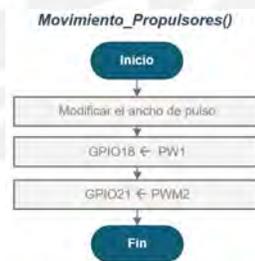


Figura 2.71. Diagrama de Flujo del movimiento de propulsores
Fuente: Propia

Para el envío de datos, a través de los sockets, y se usa la librería de Python que ya tienen las funciones necesarias para codificar la información; para esto se usa la sub-función ‘Envío de Datos’ que ordena los datos de los sensores y los envía por el socket.



Figura 2.72. Diagrama de Flujo del movimiento de propulsores
Fuente: Propia

La lectura de los sensores se realizara por medio de la sub-función 'Lectura Sensores', que por medio de las otras funciones, se encargara de leer los valores del GPS, magnetómetro y la sonda multiparámetro.

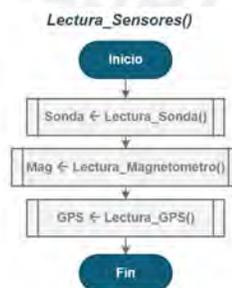


Figura 2.73. Diagrama de Flujo del movimiento de propulsores
Fuente: Propia

Finalmente, se explicara el funcionamiento del movimiento del recolector; este comienza escogiendo el sentido de giro de del motor DC, en caso el motor no llegue a la profundidad total será horario y en el caso contrario será antihorario. Luego, si la recolección ha sido activada el embebido le mandara una señal al motor a pasos para que se mueva cierto ángulo y esperara un tiempo a que se ejecute. El siguiente paso será mover el motor DC hasta que se alcance la profundidad deseada, mediante la lectura de la profundidad con la sonda; llegado a su posición el motor se detendrá y se cambiara la próxima profundidad y así sucesivamente hasta llegar a la profundidad de 50 m, donde se cambiara el sentido de giro del motor DC y la variable profundidad a cero, para que el recolector regrese a su posición inicial.

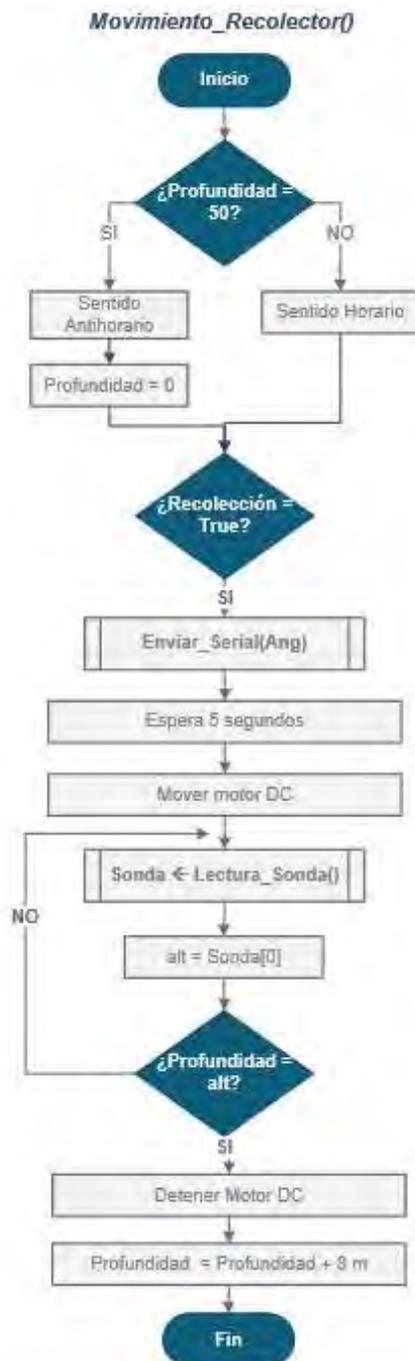


Figura 2.74. Diagrama de Flujo el movimiento del recolector
Fuente: Propia

CAPÍTULO 3

COSTOS DE LA SOLUCIÓN

En la presente sección se presentara el costo que tendría la implementación del USV, para lograr esto se desarrolló una lista de precios en base a tiendas en internet así como las proformas que se pidieron a ciertas empresa y compañías, tanto extranjeras como nacionales. En todos los precios se consideraron, en caso de ser necesario, un incremento debido a los impuestos que se generan al importar los productos del extranjero; asimismo los precios de las importaciones se encuentran en dólares americanos (USD); las proformas de los productos se encuentran en el “Anexo D”. Finalmente, se calculara el costo total, en el cual se incluye el costo de diseño, el costo del

3.1 Costos de los componentes electrónicos

Para poder estimar el costo total de los componentes electrónicos del sistema USV completo se usó la información que las páginas web de las empresa nos brindan, también se realizó búsqueda en los distintos distribuidores de componentes comerciales. En la Tabla 3.1 se puede ver el resumen de los costos de los componentes electrónicos del USV.

Tabla 3.1. Costos de componentes electrónicos.

Fuente: Propia.

Componentes Electrónicos							
Ítem	Modelo	Descripción	Proveedor	Precio Mercancía (USD)	Precio Importación (USD)	Costo Total (USD)	Costo Total (S/.)
1	600HF	04 Propulsores Submarinos	Crustcrawler	3916.00	1958.00	5874.00	20030.34
2	Sub2	01 Sonda Multiparámetro	Eureka water Probes	5500.00	2750.00	8250.00	28132.50
3	GX1	01 Cabestrante eléctrico	All Star Marine	810.00	405.00	1215.00	4143.15
4	WP-U21	01 Motor a pasos	Empire Magnetics	3000.00	1500.00	4500.00	15345.00
5	-----	05 Batería multistar 4S	Hobbyking	410.00	205.00	615.00	2097.15
6	-----	01 Batería turnigy 6S	Hobbyking	34.00	17.00	51.00	173.91
7	WBS510	01 Estación base	TP-Link	110.00	55.00	165.00	562.65
8	CEP510	01 Punto de acceso	TP-Link	70.00	35.00	105.00	358.05
9	ANT58119MS	01 Antena de Sector	TP-link	120.00	60.00	180.00	613.80
10	Modelo B	01 Raspberry Pi 3	Adafruit	35.00	17.50	52.50	179.03
11	----	01 GPS HAT	Adafruit	45.00	22.50	67.50	230.18
12	LMS303	01 Magnetómetro	Adafruit	15.00	7.50	22.50	76.73
13	----	01 Antena GPS 28 dB	Adafruit	13.00	6.50	19.50	66.50
14	TEL0007	02 Multi conversores	DFRobot	20.00	10.00	30.00	102.30
15	ELP-USBFD01M	02 Cámaras	Alipu Technology	100.00	50.00	150.00	511.50
16	2x60A	01 Roboclaw 2x60A	Pololu	200.00	100.00	300.00	1023.00
17	D24V50F5	02 Reguladores Step-down 5V	Pololu	30.00	15.00	45.00	153.45
18	D24V150F12	01 Reguladores Step-down 12V	Pololu	40.00	20.00	60.00	204.60
19	EZ17	01 Controlador de motor a pasos	All Motion	225.00	112.50	337.50	1150.88
20	ADAM-4510	01 Repetidor RS485	Advantech	113.00	56.50	169.50	578.00
Total							75,732.69

3.2 Costos de los componentes mecánicos

Con respecto a los componentes mecánicos la mayor parte de los procesos de fabricación son realizables en el Perú, para esto se realizó una cotización de los componentes y los que se exportaron. En la Tabla 3.2 se encuentra el resumen del presupuesto.

Tabla 3.2. Costos componentes mecánicos.
Fuente: Propia.

Componentes Mecánicos						
Ítem	Material	Descripción	Precio Mercancía (USD)	Precio Importación (USD)	Costo Total (USD)	Costo Total (S/.)
1	Acero	02 Tubo cuadrado 20x20x2 mm	--	--	--	51.00
2	Acrílico	04 Tapas circulares	--	--	--	328.00
3	Aluminio Anodizado	04 Soporte propulsor	--	--	--	99.60
4	Fibra de vidrio	02 Cascos de barco	--	--	--	8220.00
5	Acero	01 Plancha 605 x 425 mm	--	--	--	185.00
6	Acrílico	01 Plancha 300 x 425 mm	--	--	--	145.20
7	Acero	02 Plancha 90 x 90 mm	--	--	--	332.80
8	Acero	04 Plancha 100 x 100 mm	--	--	--	752.00
9	Acero	01 Tubo cuadrado 60x60x3 mm	--	--	--	42.00
10	HDPE	05 Piezas Hexagonales	--	--	--	240.00
11	HDPE	12 Soporte Rack	--	--	--	744.00
12	Aluminio Anodizado	24 Soporte Niskin	--	--	--	1152.00
13	Aluminio Anodizado	04 Soporte sonda	--	--	--	266.00
14	Aluminio Anodizado	06 Ejes	--	--	--	865.20
15	HDPE	06 Soporte ejes	--	--	--	390.00
16	Acero	Cáncamo M8	8	4	12	42.00
17	----	Polea 03 180	25	12.5	37.5	131.00
18	Acero	Pernos M6	50	25	75	263.00
19	Acero	Tuercas M6	10	5	15	53.00
20	Goma	Arandelas M6	20	10	30	45.00
Total						13,956.80

3.3 Costos totales

Con respecto al costo total del prototipo, este debe de incluir los costos de fabricación y los costos de diseño, en estos se incluye la mano de obra del personal calificado.

Tabla 3.3. Costos totales.
Fuente: Propia.

Concepto	Precio
Diseño del sistema	4,000.00
Fabricación del sistema	2,000.00
Componente electrónicos	75,732.69
Componentes mecánicos	13,956.80
Total	95,689.49

3.4 Costos adaptación

Con respecto a un modelo comercial adaptado para la tarea, tendrían que agregarse los costos de los componentes mecánicos y electrónicos que se encuentran sombreados en Tabla 3.1 y Tabla 3.2; así como los costos de fabricación y diseño.

Tabla 3.4. Costos de adaptación.
Fuente: Propia.

Concepto	Precio
Sistema comercial	49,500.00
Diseño de la adaptación	2,500.00
Fabricación de la adaptación	1,500.00
Componente electrónicos	50,546.44
Componentes mecánicos	4,382.20
Total	108,428.64

CONCLUSIONES

Luego del proceso de investigación desarrollado se puede concluir en primer lugar que se logró diseñar de un USV capaz de brindar una fuerza de empuje elevada (~212 kg). Esta capacidad permite al sistema soportar la carga de un recolector de muestras de (30 kg), el cual realiza de manera automática la recolección de muestras de agua a distintas profundidades y medir los datos de calidad de agua en dichos puntos.

En segundo lugar, se concluye que se puede lograr un sistema de comunicación inalámbrica que podría abarcar amplias áreas, superando ampliamente los requerimientos del sistema pudiendo lograr una comunicación de hasta 2 km, haciendo uso de un dispositivo llamado estación base. El conseguir una larga distancia permite realizar monitoreo y recolección de muestras en áreas más amplias, siendo este un factor importa en el propósito del vehículo.

Finalmente, se concluye que el costo total de desarrollar un prototipo de este tipo es más económico que la adaptación de un modelo comercial existente, por citar un ejemplo la compra de un Hydrono USV de la empresa “Seafloor” cuesta alrededor de 10,000 USD. Los costos totales del nuevo prototipo son alrededor de S/. 95,000.00, en cambio el costo total de adaptar un modelo comercial está alrededor de S/. 108,000.00.

RECOMENDACIONES

Como recomendaciones para trabajos futuros se pone énfasis en el desarrollo de un sistema de sellado dinámico para el motor a pasos del recolector, esto permitiría la reducción del costo de fabricación del sistema, para esto se tendría que diseñar un eje de acople para un motor a pasos que pueda albergar O-rings de sellado.

Adicionalmente, se recomienda mejorar el sistema de comunicación utilizado en la presente tesis, que no dependa de WLAN; debido a que este está dependiendo de corriente eléctrica en la estación base y no necesariamente se va a disponer de eso en todos los lagos.

Finalmente, se recomienda poder automatizar el movimiento del USV, de modo que este no dependa de un operario para su desplazamiento y pueda realizar tareas programadas permitiendo que la realización de un monitoreo total del lago de manera periódica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Autoridad Nacional del Agua (ANA), “Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hidricos Superficiales.” Sani Isidro, Lima, p. 92, 2016.
- [2] Autoridad Nacional del Agua (ANA), “Estrategia Nacional para el Mejoramiento de la Calidad de Recursos Hidricos,” 2016.
- [3] C. M. George *et al.*, “Arsenic exposure in drinking water : an unrecognized health threat in Peru,” no. August 2013, pp. 565–572, 2014.
- [4] Instituto Nacional de Informatica y Estadistica (INEI), “Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales,” 2015.
- [5] Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM), “Estandares de Calidad Ambiental para el agua.”
- [6] Organización Mundial de la Salud (OMS), “Water related diseases Information Sheets.” .
- [7] Ministerio de Salud (MINSA), “Indicadores Enfermedad diarreica,” 2016. .
- [8] Oficina Nacional de Dialogo y Sostenibilidad - Presidencia del Consejo de Ministros, “Willaqniki - informe de diferencias, controversias y conflictos sociales.,” 2016.
- [9] J. Ekelmann and B. Butka, “Seagle 3 . 0 An Autonomous Surface Vehicle,” 2012.
- [10] J. Gutiérrez, F. Villa-medina, M. Á. Porta-gándara, E. Group, and C. De Investigaciones, “Autonomous Surface Vehicle for Measuring Water Body Parameters,” pp. 1–5, 2010.
- [11] G. Antonelli, *Underwater Robots*. .
- [12] T. C. Furfaro, J. E. Dusek, and K. D. Von Ellenrieder, “Design , Construction , and Initial Testing of an Autonomous Surface Vehicle for Riverine and Coastal Reconnaissance,” 2009.
- [13] E. Iscar and M. Johnson-roberon, “Autonomous Surface Vehicle 3D Seafloor

- Reconstruction from Monocular Images and Sonar Data,” no. April, 2015.
- [14] H. Ferreira *et al.*, “SWORDFISH: an Autonomous Surface Vehicle for Network Centric Operations,” pp. 1–6, 2007.
- [15] T. Nakatani, T. Hyakudome, T. Sawa, and Y. Nakano, “Development of an autonomous surface vehicle for monitoring underwater vehicles,” 2015.
- [16] J. Osaku, A. Asada, and F. Maeda, “Implementation of machine learning algorism to autonomous surface vehicle for tracking and navigating AUV,” pp. 0–3, 2013.
- [17] I. Lane, J. R. Higinbotham, P. G. Hitchener, J. R. Moisan, and D. Ph, “Development of a New Long Duration Solar Powered,” 2006.
- [18] J. Wang, W. Gu, and J. Zhu, “Design of an Autonomous Surface Vehicle Used for Marine Environment Monitoring,” 2009.
- [19] S. Kemna, D. A. Caron, and G. S. Sukhatme, “Constraint-induced formation switching for adaptive environmental sampling,” 2015.
- [20] G. Ferri *et al.*, “The HydroNet ASV , a Small-Sized Autonomous Catamaran for Real-Time Monitoring of Water Quality : From Design to Missions at Sea,” vol. 40, no. 3, pp. 710–726, 2015.
- [21] F. Fornai *et al.*, “Peer-Reviewed Technical Communication,” pp. 1–8, 2016.
- [22] F. J. Pereda, H. G. De Marina, J. M. Giron-sierra, J. Jimenez, D. Acya, and F. Fisicas, “Towards automatic oil spill confinement with Autonomous Marine Surface Vehicles,” pp. 0–5, 2011.
- [23] Q. Xiaowei and Z. Aiping, “The Simulation for Autonomous Navigation of water-jet-propelled Unmanned Surface Vehicle,” 2011.
- [24] B. Braginsky and H. Guterman, “Trajectory Controller for Autonomous Surface Vehicle Under Sea Waves,” 2015.
- [25] B. M. Ferreira and C. Matos, “Water-jet Propelled Autonomous Surface Vehicle UCAP : System Description and Control,” pp. 4–8, 2016.
- [26] J. Wang, W. Gu, J. Zhu, and J. Zhang, “Energy Consumption Analysis of Electric Propulsion System Used in Autonomous Surface Vehicle I · (,” no. 7, pp. 191–195, 2009.

- [27] Clearpath Robotics, “Hero Datasheet.” 2016.
- [28] ASV unmanned marine systems, “C-Cat 2 Datasheet.”
- [29] Seafloor, “Hydrone-RCV Datasheet.” .
- [30] Deep Ocean Engineering, “I-1650 Datasheet.” .
- [31] EvoLogics, “Sonobot - Product information guide.”
- [32] S. Kos, D. Ph, V. Frančić, and M. Sc, “Comparative analysis of conventional and swath passenger catamaran,” pp. 1–11.
- [33] R. A. Feely, C. L. Sabine, F. J. Millero, and C. Langdon, “Carbon Dioxide, Hydrographic and Chemical data obtained during the R/Vs cruises in the pacific ocean.,” 2009.
- [34] B. S. Theory, “Basic Ship Theory.”
- [35] “How to design a sailing catamaran?,” pp. 1–11, 2008.
- [36] N. G. Foreto Saboya, “Normas de Comunicación en Serie :,” no. 2, pp. 86–94, 2012.
- [37] J. Prieto Blazque, “Introducción a los sistemas de comunicación inalámbricos.” p. 30.
- [38] “Plan nacional de atribución de frecuencias pnaf.”