



PROGRAMA NACIONAL
DE INNOVACIÓN EN
PESCA Y ACUICULTURA

Sistema Robótico de Identificación Contención y Retiro de Hidrocarburos en el Mar Peruano

PNIPA-PES-SIA-2022-00266

Informe Hito 2

Informe técnico de Oil skimmer y Boyas de contención instalados sobre un USV

Elaborado por:
Arce Cigüeñas, Diego Martín

Aprobado por:
Akamine Serpa, Claudia Maritza

Lima, Diciembre de 2022

Resumen

El presente trabajo consiste en el desarrollo de un sistema de recolección de petróleo compuesto por 3 USV (Unmanned Surface Vehicle o Vehículo Superficial No tripulado), donde 1 USV será el principal y se le unirá elementos principales como Power pack, contenedor, entre otros; este USV principal será conectado mediante barreras hacia 2 USV auxiliares, los cuales servirán como guías para su correcto desplazamiento. Todo este sistema descrito debe ser capaz de desplazarse mientras realiza la operación de succión de derrames de petróleo ocurridos en mares y lagos. La problemática que incentiva este proyecto es la necesidad de una respuesta rápida ante los derrames de petróleo que ocurren cada vez con mayor frecuencia en los cuerpos hídricos debido a la negligencia humana. Este sistema es operado a distancia por una persona que, mediante un controlador remoto con joysticks, pueda posicionar dentro del área de riesgo ambiental los vehículos superficiales y el dispositivo de succión acoplado a estos.

El proyecto comprende el ensamble y diseño de las estructuras y algoritmos de comunicación y control de los USV auxiliares , así como el diseño de los acoplos entre los diferentes componentes del sistema total. Asimismo, se realiza la selección de componentes electrónicos que permitirán la localización, direccionamiento, comunicación entre cada USV y alimentación del sistema.

Índice

Resumen	2
Índice	3
1.0. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	4
1.1. Presentación de la problemática: Limpieza de derrames de petróleo en ecosistemas marinos.	4
1.2. Antecedentes:	8
1.2.1. Productos integrales comerciales	8
1.2.1.1. Sea Machines SM300 KVICHAK / MARCO FILTERBELT BOAT	8
1.2.1.2. SWORC	9
1.2.1.3. Autonomous Oil Skimmer (AOS)- Alion Science and Technology	10
1.2.2. Sistemas integrales en desarrollo	11
1.2.2.1. SEASWARM - MIT:	11
1.2.2.2. Bio cleaner system	12
1.2.2.3. Robot semiautónomo de remoción de petróleo	12
1.2.2.4. EU-MOP	13
1.2.3. Tecnologías existentes de recolección de petróleo mediante skimmers	14
1.2.4. Tecnologías existentes del sistema de Energía	19
1.2.5. Subsistema de detección de petróleo	21
1.3. Formulación de propuesta de sistema mecatrónico:	24
1.3.1. Propuesta de solución	24
1.3.2. Objetivos	24
1.3.3. Requerimientos del sistema mecatrónico	25
1.4. Metodología de trabajo	28
2.0. CAPÍTULO 2: DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO	30
2.1. Presentación del sistema mecatrónico integrado	30
2.2. Presentación del sistema eléctrico - electrónico	30
2.2.1. Diagrama de bloques- USV auxiliar	31
2.2.2. Descripción de los componentes del USV auxiliar	34
2.2.2.1. Módulo de energía	34
2.2.2.1.1. Batería de polímero de litio	35
2.2.2.1.2. Convertidor aislado DC/DC Reductor de tensión	35
2.2.2.2. Módulo de potencia	37
2.2.2.2.1. Propulsor Brushless DC (BLDC)	37
2.2.2.2.1. Controlador de velocidad Electrónico (ESC)	38
2.2.2.3. Módulo de control y sensado	38
2.2.2.3.1. Arduino UNO R3	38

2.2.2.3.1.Unidad de medición inercial (IMU)	39
2.2.2.3.1.Sensor de posición GPS	40
2.2.2.3.1. Módulo de comunicación Radio Frecuencia	41
2.3. Presentación del sistema mecánico	42
2.4. Presentación del sistema de control	44
2.5. Costos para fabricación y compras	44
3.0. CAPÍTULO 3: INTEGRACIÓN Y PRUEBAS	50
3.1. Informe de pruebas inmediatas y finales	59
3.2. Informe de resultados de simulaciones realizadas	62
4.0. CONCLUSIONES	67
5.0 RECOMENDACIONES	68
6.0. BIBLIOGRAFÍA	68
A. ANEXO A: MEMORIA DE CÁLCULO	73
A.1. Cálculos mecánicos - USV auxiliar	73
A.2. Cálculos eléctricos - USV auxiliar	79
B. ANEXO B: DIBUJOS/PLANOS MECÁNICOS ELECTRÓNICOS	81
B.1. Planos de despiece, ensamble y subensamble	81
B.2. Planos de esquemas eléctricos, electrónicos y de control	83
B.3. Programas de operación documentados	89
B.4. Listado de partes e insumos	93
B.5. Exploración de proveedores de materiales y componentes	94

1.0. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación de la problemática: Limpieza de derrames de petróleo en ecosistemas marinos.

Luis Angel Pineda - Director de comunicaciones de FENADEC, en su artículo publicado el 29 de junio de 2020, “La importancia del petróleo en la economía”, resalta que para los países del mundo, el petróleo se ha convertido en un recurso clave ya que su utilidad va desde la fabricación de plásticos hasta la generación de energía eléctrica.

Sin embargo, durante su transporte, en ocasiones se producen accidentes o malas prácticas que conllevan consecuencias devastadoras. Una mala práctica habitual es usar agua de mar en tanques cisterna, para, posteriormente, devolverla contaminada con petróleo; otra práctica indebida es usar buques para bombear petróleo de desecho al mar en forma de desperdicio. Una forma accidental de contaminación por petróleo es la perforación de pozos de petróleo ubicados en aguas costeras y las fugas en tuberías subacuáticas.

Según la United Nations Environment Programme(s. f.) y NOAA (s. f.), las principales víctimas de los derrames de petróleo son la fauna y la flora del lugar y de zonas aledañas. El petróleo destruye la capa aislante que protege del frío a las aves y mamíferos marinos con pelaje, como las nutrias marinas; sin esta capacidad de repeler el frío se les estaría exponiendo a elementos químicos agresivos y podrían morir de hipotermia. En algunos peces, delfines y ballenas, inhalar o ingerir directamente el petróleo puede deteriorar sus sistemas respiratorio, inmunológico y reproductivo, e incluso puede causar muerte por envenenamiento, o pueden experimentar crecimiento reducido, hígados agrandados, cambios repentinos en el ritmo cardíaco y erosión en las aletas. Aún cuando estas consecuencias no sean visibles, los pescados y mariscos afectados no serían seguros para consumo humano. El vertido de crudo también produce daños notables en el paisaje costero, pero su carácter biodegradable permite que pueda ser separado del mar, mediante diversos métodos físicos o químicos, muchos de los cuales afectan el transcurso normal de la vida marítima.

En el Perú, de acuerdo con el informe *La sombra del petróleo (2020)*, han ocurrido 474 vertimientos entre los años 2000 y 2019 en los lotes petroleros del Oleoducto NorPeruano

ubicado en la Amazonía Peruana. También se indica que el 65% de estos vertimientos fue causado por la corrosión de los ductos y fallas en la infraestructura petrolera.

El caso más reciente fue el ocurrido en el mar de Ventanilla en enero del 2022, el cual fue responsabilidad de la empresa Repsol y en el que se derramaron más de 11 900 barriles de petróleo en, según el reporte de la SPDA, el Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (Sernanp) declaró que este desastre afectó la vida silvestre de la Reserva Nacional Sistema de Islas, Islotes y Puntas Guaneras, y la Zona Reservada Ancón, afectando un área equivalente a 1 800 490 m² de suelo y 7 139 571 m² de mar. (Spda, 2022)

Al respecto, un comunicado del Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (Sernanp), organismo adscrito al Ministerio del Ambiente, indicó que en las 6 semanas posteriores al incidente se rescataron a más de 420 aves afectadas por el derrame de petróleo cerca a dos áreas naturales protegidas ubicadas en el distrito de Ancón en el norte de Lima.(Deutsche Welle, s. f.)

Solo en la bahía de Ancón, según cálculos de la organización The Nature Conservancy (TNC), trabajan alrededor de mil pescadores, que extraen mariscos y peces, otros que trabajan en el procesamiento y comercialización de productos marinos, e incluso quienes realizan actividades turísticas.(Spda, 2022). Al respecto, la organización Oceana Perú elaboró un reporte sobre los ingresos promedio que perciben los pobladores gracias a la pesca artesanal y no artesanal en las zonas de Ancón y Chancay (Oceana, 2022), puntos principales afectados por el derrame de enero del 2022. En este informe se indica que la actividad de pesca originó 11 millones de dólares entre los años 2016 y 2020 (2.3 millones al año) en esos 2 puntos de desembarque, y además, se estima el número de capturas de peces realizadas en el ámbito costero, el cual fue el más afectado en este accidente, en esos años (Figura XX). Por otro lado, se aproxima los ingresos anuales de los pescadores en los desembarques de Ancón y Chancay generados por la actividad pesquera (Figura XX) y donde se evidencia que con respecto a los volúmenes totales de pesca, las capturas en la zona costera representan el 25% y el 64% de los ingresos por pesca total en Ancón y Chancay, respectivamente. Estas cifras son un ejemplo de las actividades económicas que dependen directamente de la flora y fauna del litoral, y también muestran el impacto económico que habría generado el derrame de hidrocarburos en la zona al perder la principal fuente de ingresos de los pobladores.

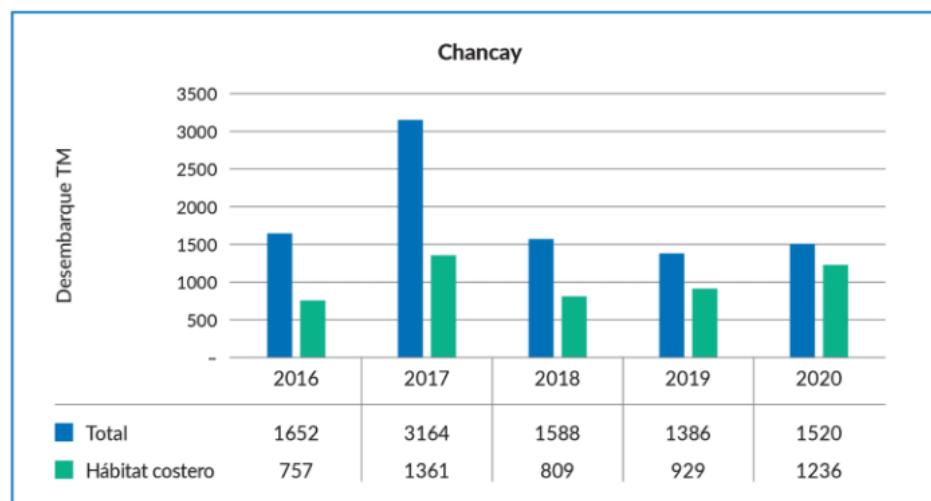
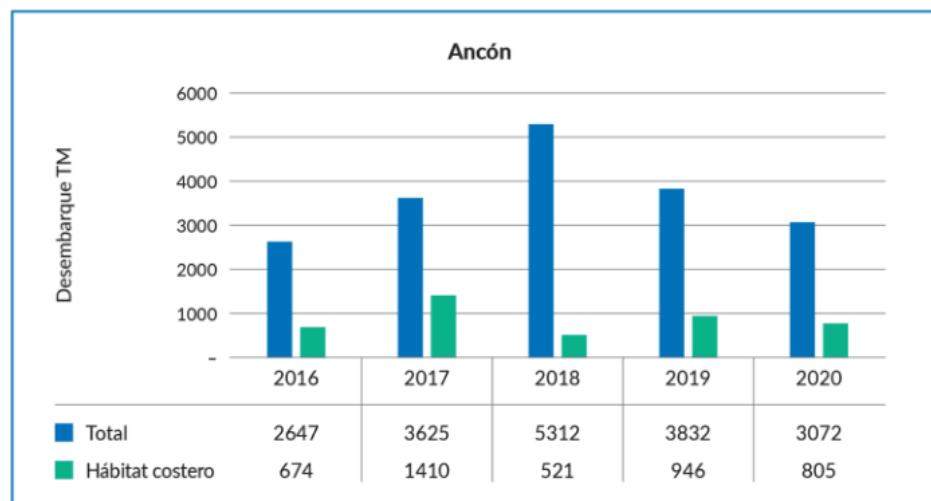


Figura 1.1.1. Ingresos estimados del desembarque costero en soles corrientes

Fuente: Oceana

ANCÓN	BENTÓNICO / INTERMAREAL	DEMERSAL COSTERO	PELÁGICA COSTERA	TOTAL COSTERA	TOTAL ESPECIES NO COSTERAS
2016	1,691,308	1,830,998	98,166	3,620,472	10,118,220
2017	3,638,910	3,403,634	557,780	7,600,323	14,740,192
2018	360,720	2,397,874	192,460	2,951,054	22,689,154
2019	1,095,603	3,595,506	530,027	5,221,136	11,949,478
2020	1,034,032	1,923,787	187,311	3,145,129	8,712,190
PROMEDIO	1,564,114	2,630,360	313,149	4,507,623	13,641,847

Figura 1.1.2. Ingresos estimados del desembarque costero en soles corrientes

FUENTE: Oceana

CHANCAY	BENTÓNICO / INTERMAREAL	DEMERSAL COSTERO	PELÁGICA COSTERA	TOTAL COSTERA	TOTAL ESPECIES NO COSTERAS
2016	237,967	2,112,196	229,875	2,580,038	1,706,803
2017	206,463	3,725,685	703,206	4,635,353	4,496,165
2018	203,303	2,264,118	457,918	2,925,339	2,540,628
2019	323,014	3,329,239	221,269	3,873,523	1,135,712
2020	657,027	3,126,015	618,116	4,401,159	653,698
PROMEDIO	325,555	2,911,451	446,077	3,683,082	2,106,601

Figura 1.1.3. Ingresos estimados del desembarque costero en soles corrientes

FUENTE: Oceana

1.2. Antecedentes:

En esta sección se describe la información existente y el avance tecnológico actual sobre la limpieza semiautomática de hidrocarburos en cuerpos de agua, utilizando tanto sistemas fijos como soluciones móviles.

1.2.1. Productos integrales comerciales

En esta sección se presentan los diferentes productos que existen en el mercado, que cumplen con el objetivo de desplazarse sobre el agua y recolectar petróleo, mientras es almacenado dentro del sistema.

1.2.1.1. Sea Machines SM300 KVICHAK / MARCO FILTERBELT BOAT

Esta embarcación integrada fue desarrollada por la empresa Sea Machines y entre sus características se encuentran controlar remotamente el vehículo desde una embarcación secundaria o desde la orilla, puede realizar el seguimiento autónomo de puntos de trayectoria y de líneas sobre la superficie del mar, posee autonomía colaborativa para operaciones con múltiples embarcaciones y permite el despliegue de la barrera, cinta transportadora y otros equipos de manera remota. Además, la velocidad de traslación de la embarcación es de 1-3 nudos (0.5 - 1.5 m/s) y su capacidad de recolección de petróleo es de 55 m³ / h (Sea Machines, 2018).



Figura 1.2.1 - Embarcación SM300 KVICHAK. Fuente: Sea machines, 2018

1.2.1.2. SWORC

Esta embarcación fue diseñada para recolectar petróleo incluidas áreas de calado limitado, vías interiores y costeras, para proporcionar una respuesta inmediata a un accidente marítimo. Emplea un sistema de embolsado único que permite contener el aceite recogido mediante un skimmer de cepillo LAMOR en una bolsa que se puede sellar, y que se deja caer entre los cascos del buque para su posterior recogida por una embarcación auxiliar. Las dimensiones de este sistema son de 5.8 m de longitud, 3.1 m de ancho y 2.2 m de altura, así como un peso de 1800 kg y el skimmer tiene una velocidad de recolección de 40 m³ / h y puede desplazarse hasta 7.5 m/s (Knud E.Hansen, 2022).

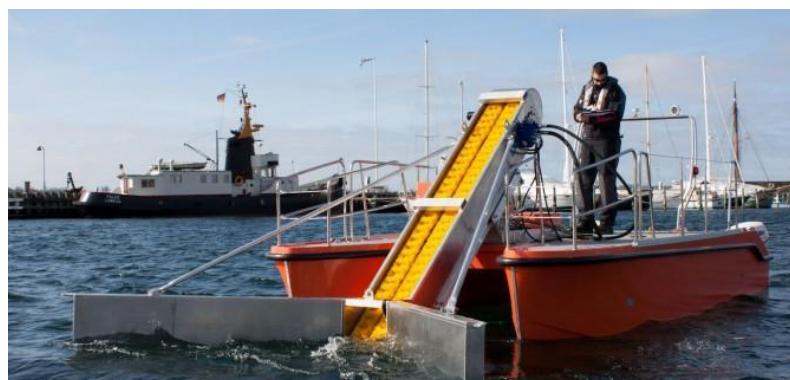


Figura 1.2.2 - Embarcación SWORC. Fuente: Knud E.Hansen

1.2.1.3. Autonomous Oil Skimmer (AOS)- Alion Science and Technology

Esta embarcación fue diseñada para recolectar petróleo incluidas áreas de calado limitado, vías interiores y costeras, para proporcionar una respuesta inmediata a un accidente marítimo. Cuenta con un sensor de petróleo para medir el espesor de la capa de petróleo y la posición de

este, permite el manejo autónomo mediante un sistema de control de motores y posee acoplado el skimmer TDS118 de tambores de la empresa ELASTEC. La velocidad de traslación es de 0.4 a 0.8 m/s y la velocidad de recolección es de 0.375 a 0.75 m/s. (IOSC, 2022)



Figura 1.2.3 - Embarcación AOS.

Fuente: IOSC

En la Tabla 1, se resumen las características principales como las dimensiones, la velocidad de recolección y desplazamiento de los sistemas mencionados anteriormente.

Tabla 1. Tecnologías USV - Oil Skimmer

Fuente; Elaboración propia

Modelo	Sea Machines SM300 KVICHAK / MARCO FILTERBELT BOAT	SWORC (Knud-E-Hansen)	Autonomous Oil Skimmer (AOS)- Alion Science and Technology
Peso	2500 kg	1800 kg	2300 kg
Dimensiones (L - W - H)	9 m - 6 m - 5 m	5.8 m - 3.1 m - 2.2 m	7 m - 3 m - 4 m
Capacidad de recolección	55 m3/h	40 m3/h	20 m3/h
Velocidad de traslación	0.5 - 1.5 m/s	7.5 m/s	0.4 - 0.8 m/s
Capacidad de almacenamie nto de petróleo	5000 litros	500 litros	1500 litros

1.2.2. Sistemas integrales en desarrollo

En esta sección se presentan las diferentes patentes o sistemas diseñados que cumplen con el objetivo de desplazarse sobre el agua y recolectar hidrocarburos sobre el agua , pero que están en proceso de desarrollo e implementación y son de baja capacidad de almacenamiento.

1.2.2.1. SEASWARM - MIT:

Este sistema de tipo enjambre de vehículos está compuesto por múltiples robots que remueven petróleo de forma mecánica usando una cinta transportadora cubierta con nanomateriales y comunican su ubicación mediante comunicación GPS y wifi. Cada robot se alimenta de celdas fotovoltaicas que generan energía suficiente para mantener el proceso durante varias semanas. La cinta transportadora está fabricada con una malla de nanocables que pueden absorber 20 veces su peso en petróleo, y mientras el robot se mueve, gira constantemente sobre la superficie del agua, absorbiendo los hidrocarburos mientras rechaza el agua, debido a las propiedades hidrofóbicas del material de la cinta. (Sea Swarm, s. f.)



a)

b)

Figura 1.2.4 - a) Robot individual. b) Sistema enjambre.

Fuente: Sea Swarm(s. f.)

1.2.2.2. Bio cleaner system

Según Shah et al. (2018), este sistema robótico submarino autónomo usa métodos basados en nanotecnología para remover los derrames de petróleo del agua. En particular, se emplean nanopartículas de plata (Ag) sintetizadas para absorber el petróleo y el agua, para después separar agua cristalina y expulsarla, mientras el petróleo queda almacenado en un contenedor. Además, localiza e identifica crudo de petróleo usando biosensores que detectan los hidrocarburos en la zona contaminada. mientras realiza la operación de limpieza, usa un

dispositivo de ondas acústicas para mantener lejos de la contaminación y del proceso a las especies marinas que estén presentes cerca de la zona. Sin embargo, el uso de nanomateriales puede tener consecuencias negativas en la salud humana en caso sean inhaladas, absorbidas en la piel o digeridas. Otro punto importante de este sistema es que la alimentación se realiza por baterías alimentadas por agua del océano.

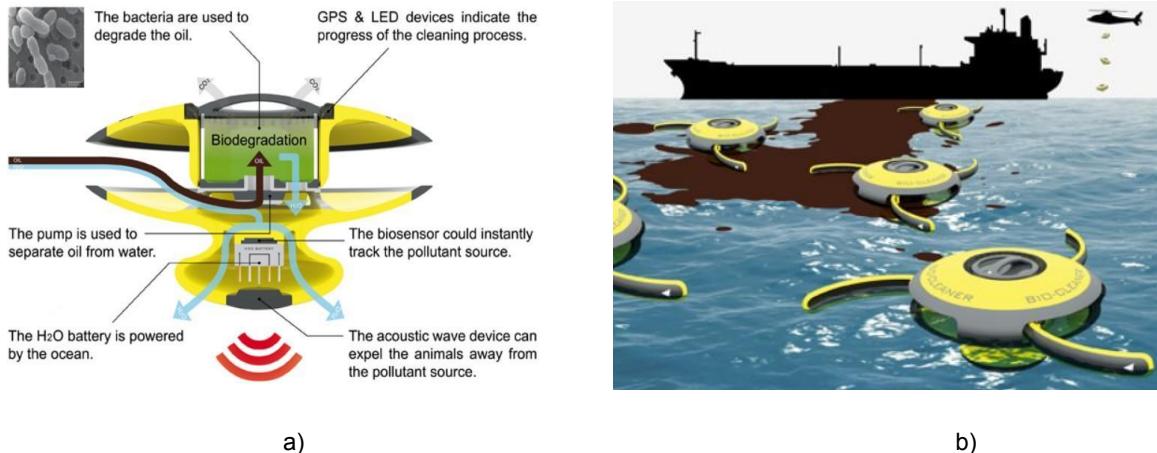


Figura 1.2.5: a) Robot individual Bio-cleaner. b) Sistema enjambre Bio-cleaner system.

Fuente: Shah et al. (2018)

1.2.2.3. Robot semiautónomo de remoción de petróleo

Este prototipo de dispositivo robótico emplea una faja transportadora magnética inclinada que gira continuamente sobre la superficie del agua. Antes de comenzar el movimiento, se rocía polvo de magnetita con el objetivo de que el petróleo se adhiera a la magnetita y flote en la superficie. Luego, el polvo de magnetita, junto con el petróleo es atraído por la faja transportadora magnética y ambos se adhieren a su superficie. Finalmente, el petróleo se transporta hasta ser separado de la faja mediante una placa de metal ubicada en la parte trasera del robot y es almacenado en un tanque hasta llenarlo a un determinado nivel. (Vigneshwaran & Yuvaraj, 2021)

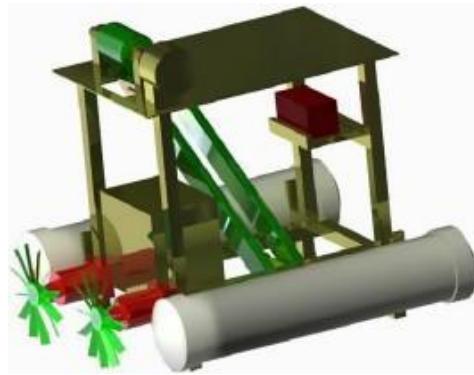


Figura 1.2.6: Diseño del prototipo del robot semiautónomo de limpieza de petróleo.

Fuente: Vigneshwaran & Yuvaraj (2021)

1.2.2.4. EU-MOP

Esta propuesta emplea un enjambre de robots coordinados que necesita ser transportado y desplegado por una embarcación cercana a la mancha de petróleo. Todas las unidades detectan las áreas objetivo mediante sensores y pueden volver a la nave de despliegue con el objetivo de descargar el petróleo recolectado o cuando su autonomía energética se consume. El petróleo es recogido mediante métodos mecánicos como cepillos absorbentes o una cinta transportadora de absorción. Además, este sistema no necesita operadores humanos que controlen el proceso de carga y descarga de los robots, pues cuenta con inteligencia artificial que decide cómo y cuándo se controlan estos procesos.

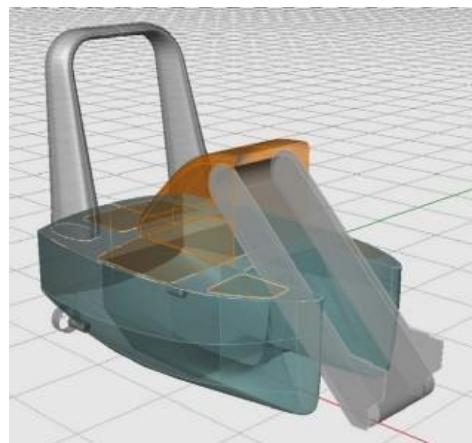


Figura 1.2.7: Diseño del EU-MOP.

Fuente: Kakalis y Ventikos (2008)

En la Tabla 2, se comparan los diferentes sistemas existentes y en desarrollo que plantean resolver la problemática de la limpieza de derrames de petróleo en océanos.

Tabla 2 : Comparación de los sistemas robóticos de limpieza de petróleo.

Fuente: Propia

Especificación	SEASWARM	BIO-CLEANER SYSTEM	ROBOT SEMIAUTÓNOMO	EU-MOP
Dimensiones (LxAxH)	200x50x60 cm	50x50x40 cm	100x60x80 cm	80x50x60 cm
Peso (kg)	65	38	54	45
Modo manual (teleoperado)	Sí	No	Sí	No
Modo automático	Sí	Sí	No	Sí
Año de desarrollo	No se especifica	2018	2019	2008
País de desarrollo	EE.UU.	Japón	India	EE.UU.
Tipo de alimentación	Celdas fotovoltaicas	Batería LiPo y panel solar	1 batería de 80 W y 1 batería de 85 W	Baterías LiPo
Almacenamiento integrado de petróleo	Sí	Sí	Sí	Sí
Método separación de petróleo	Faja transportadora	Nanopartículas	Faja transportadora magnética	Cepillos absorbentes
Modo de enjambre	Sí	Sí	No	Sí

1.2.3. Tecnologías existentes de recolección de petróleo mediante skimmers

Los skimmers, también llamados desnataidores de aceite, son dispositivos que pueden separar el petróleo del agua sin que se cambien las propiedades de ninguno, de esta manera, al finalizar el proceso, el petróleo puede ser reutilizado y el agua no posee elementos orgánicos en su composición (Dave, 2011). El principio de recolección depende de las propiedades físicas de los aceites, entre ellas tenemos a la gravedad específica, tensión superficial y afinidad. La mayoría de aceites son ligeros y no tiene afinidad química con el agua, lo que

previene que ambos alcancen a mezclarse y en consecuencia sean posibles de recoger mediante skimmers. Sin embargo, existen hidrocarburos que no pueden ser recolectados usando un skimmer, debido a que estos compuestos tienen una gravedad específica menor que la del agua, con lo que no permanecen flotando en la superficie del agua. (Grill y Linde, 2013)

Los mecanismos de remoción de petróleo se dividen en skimmers oleofílicos y no oleofílicos:

Skimmer Oleofílicos:

Su principio de funcionalidad está basado en la propiedad de afinidad que tienen ciertos materiales a la adherencia con el petróleo y repelencia con el agua. Por tanto, la lógica de funcionamiento es tener una superficie con la peculiar propiedad de dicho material, para que así cuando se haga pasar una mezcla de petróleo y agua por la superficie, esta logre quedarse adherida con solo el hidrocarburo. Posteriormente, se debe usar algún mecanismo, como cuchillas, para poder recoger el aceite adherido a la superficie; y de esa manera todo el hidrocarburo recolectado pueda ser transportado a un depósito por medio de bombas. Para el presente estudio, se enfocará en mayor detalle con este tipo de skimmer.

Entre los skimmers que utilizan la técnica oleofílica se encuentran los siguientes:

- Skimmers de Disco
- Skimmers de Cuerda
- Skimmers de Tambores
- Skimmers de Cepillos
- Skimmers de Correas

Para conocer las ventajas y desventajas que tiene cada tipo de skimmer, se elaboró un cuadro comparativo con las principales características que tiene cada uno.

Tabla 3: Cuadro comparativo entre tipos de skimmer

Fuente: Adaptado de (ITOPF, 2012)

	Skimmer de Disco	Skimmer de Cuerda	Skimmer de Tambores	Skimmer de Cepillos	Skimmers de Correas
Tasa de Recuperación	Depende de la cantidad y tamaño de discos a usar. Por lo general se usan discos ranurados.	Depende de la cantidad y velocidad de las cuerdas. Generalmente bajo.	Depende de la cantidad y tamaño de tambores a usar.	Depende de la cantidad y velocidad de los cepillos.	Capacidad de baja a media.
Características del aceite	Más efectivo en aceites medianos.	Más efectivo en aceites medianos y pesados.	Más efectivo en aceites livianos, mediano y pesado.	Más efectivo en aceites medianos y pesados.	Más efectivo en aceites medianos y pesados.
Condiciones del mar	En olas bajas y poca agua arrastrada. Se puede hundir en aguas agitadas	Puede operar en aguas agitadas	Soporta olas bajas. Se puede hundir en aguas agitadas	Se recolecta poca agua libre o arrastrada	Puede operar en aguas agitadas
Capacidad de robustez	BAJA Puede obstruirse con escombros.	ALTA Capaz de tolerar escombros significativos, hielo, entre otros.	BAJA Puede obstruirse con escombros.	MEDIANA Capaz de tolerar escombros medianos	MEDIANA Capaz de tolerar escombros medianos
Accesorios a usar	Paquete de energía separado: mangueras hidráulicas y de descarga, bomba y un depósito para almacenarlo.	Solo para las unidades pequeñas, se cuenta integrado el suministro de energía y el almacenamiento	Paquete de energía separado: mangueras hidráulicas y de descarga, bomba y un depósito para almacenarlo	Paquete de energía separado: mangueras hidráulicas y de descarga, bomba y un depósito para almacenarlo	Capaz de entregar aceite directo a su almacenamiento en la parte superior de la correa.

Skimmer No Oleofilicos:

Su principio de funcionalidad no está basado en la adherencia del hidrocarburo, sino está enfocado en usar sistemas de succión, de vertedero, depende de la gravedad y mecánicos, levantan físicamente el petróleo con palas o cucharas.

- Skimmers de succión
- Skimmers de rebosadero o vertedero

El presente trabajo mostrará productos comerciales ofrecido por empresas conocidas en brindar solucionar ante derrames de petróleo: Lamor, Elastec y Surf Cleaner

1) Lamor Minimax 30 (LMM 30):

Es un skimmer de correa y un sistema de cepillo que va montado en él. Diseñado para estanques, ríos y puertos. El skimmer arrastra el petróleo hacia la correa con una hélice de succión, lo que permite una tasa de recuperación de 30m³/h en condiciones naturales. Es más eficiente en aceites de alta viscosidad y también es capaz de recolectar desechos aceitosos. El skimmer junto con las bombas, la fuente de alimentación, el tanque de almacenamiento y las mangueras necesarias cuesta alrededor de 40 000 euros (Linde y Grill, 2013).



*Figura 1.2.8: LMM 30
Fuente: Lamor*

2) TDS118- Elastec:

Es un tambor diseñado tanto para aplicaciones industriales como para derrames de petróleo ocasionados en lagos y ríos. Este skimmer puede recuperar una variedad de aceites con contenido de agua del 2 a 3%. Tiene la posibilidad de usar tambores ranurados, lo cual hace que su tasa de recuperación incremente de 0.72 a 1.83 m³/h. (Linde y Grill, 2013).

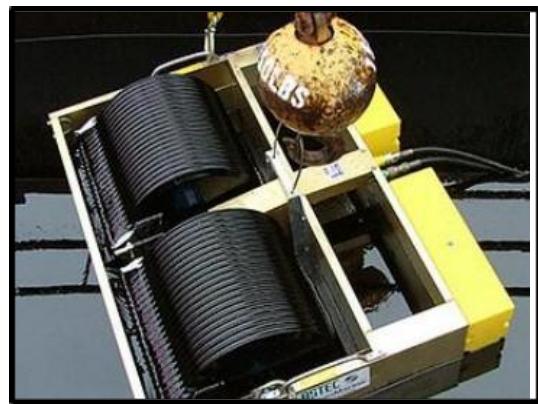


Figura 1.2.9: TDS 118

Fuente: Elastec

3) SCC 400 y SCC 150- Surf Cleaner:

Ambos skimmers están enfocados en la remoción de aceites y lodo de mediana y baja viscosidad. Contiene solo dos partes móviles, el anillo del vertedero y la hélice, lo que resulta en un desgaste mecánico mínimo y bajos costos de servicio. Por medio de sensores, el Surf Cleaner puede autorregularse completamente para un funcionamiento continuo y desatendido. (Linde y Grill, 2013).



Figura 1.2.10: Imagen referencial de skimmers Surf Cleaner

Fuente: Surf Cleaner

4) Multi Skimmer MS60:

Skimmer hidráulico de gran capacidad para trabajar en alta mar. Recupera los hidrocarburos en la superficie del océano mediante un cartucho giratorio que, como en toda la gama de Multi Skimmers de Markleen, recoge un porcentaje mínimo de agua (inferior al 2% en pruebas de laboratorio) con respecto al hidrocarburo. El MS 60 puede disponer de hasta 3 cartuchos diferentes y fácilmente intercambiables, de cepillos, discos y tambor, para cubrir toda la gama de viscosidades a recuperar (Markleen, 2022).



Figura 1.2.11: MS60

Fuente: Markleen

Para una mejor visualización de las características más resaltantes que posee cada skimmer, se realizará una tabla comparativa que muestre ello.

Tabla 4: Cuadro comparativo entre características técnicas de Skimmers Comerciales
Fuente: Elaboración propia

	LMM 30	TDS118	SCC400	SCC 150	MS60
Tasa de Recuperación	30 m3/h	0.72-1.83 m3/h	12 m3/h	1.2m3/h	>20m3/h
Aplicación	estanque, ríos y puertos	lagos y ríos	lagos,rios, mar	lagos y ríos	offshore
Peso	No se especifica	No se especifica	210 kg	35 kg	No se especifica
Precio	40 000 EUR	No se especifica	No se especifica	No se especifica	No se especifica

1.2.4. Tecnologías existentes del sistema de Energía

1.2.4.1. Baterías eléctricas:

De acuerdo con Moreno et al.(2014), están compuestas por una o más celdas electroquímicas que convierten la energía química almacenada en energía eléctrica. Se clasifican en:

Primaria. No se pueden recargar. Mayor densidad de energía que las secundarias, pero más costoso. Ejemplo: Alcalinas.

Secundaria. Se pueden recargar y son las que se emplean mayormente. Dentro de esta categoría se encuentran las baterías de ion de litio, litio-ferrofosfato (LiFePo₄) y polímero de litio, las cuales presentan una alta densidad de energía, poco peso y larga vida útil. Además, se encuentran las baterías de plomo ácido las cuales presentan una mayor eficiencia, no tienen efecto de memoria y se descargan en un mayor tiempo a comparación de las baterías de litio (DirectIndustry, s.f.).



Figura 1.2.12: Batería de Ión de Litio.

Fuente: Baterías Recargables de Li-Ion 20Ah Amp Horas, s. f.

1.2.4.2. Celdas de combustión:

Generan energía eléctrica por medio de una reacción química entre un combustible y un agente oxidante. Una pila de combustible requiere de un flujo constante de combustible y elemento oxidante para generar energía eléctrica. Generalmente, estos poseen mayor autonomía que las baterías, pero los tanques de combustible deben estar presurizados. (Moreno et al., 2014)



*Figura 1.2.13: Celda de combustible .
Fuente: ¿Qué son las células de combustible?, s.f.*

1.2.4.3. Celdas fotovoltaicas:

Son dispositivos que convierten la energía solar en electricidad. La conversión puede ser vía el efecto fotovoltaico o previa conversión de energía solar a calor o a energía química. La mayoría de celdas fotovoltaicas produce aproximadamente 0.5 Volts y son de silicio monocristalino. La corriente que entrega la celda depende de la superficie de esta. (Delgado, s. f.)



*Figura 1.2.14: Celdas fotovoltaicas.
Fuente: ¿Cómo funcionan las celdas fotovoltaicas?, 2019*

1.2.4.4. Comparación de los sistemas de energía:

En la Tabla 5, se comparan los diferentes sistemas existentes para fuentes de alimentación.

Tabla 5 : Comparación de las fuentes de alimentación. Fuente: Propia

Especificación	Batería	Celdas de combustión	Celdas fotovoltaicas
Disponibilidad comercial	Sí	Sí	Sí
Principio de funcionamiento	Energía química - Energía eléctrica	Energía química por combustible - Energía eléctrica	Energía solar - Energía eléctrica
Ejemplo	Batería de Li-on	Celdas de combustión alcalinas	Celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino

1.2.5. Subsistema de detección de petróleo

1.2.5.1 Fluoro Sensores láser

Los fluoros sensores láser emplean la propiedad de que ciertos compuestos en el petróleo absorben la luz ultravioleta y vuelven a emitir una parte de esta energía en la región visible del espectro. Pocos otros compuestos muestran esta tendencia, por lo que la emisión de fluorescencia es fuertemente indicativa de la presencia de aceite. Las sustancias naturales, como la clorofila, emiten fluorescencia a longitudes de onda suficientemente diferentes para evitar confusiones. Las diferentes clases de aceite producen formas e intensidades espectrales fluorescentes ligeramente diferentes. Por lo tanto, se puede diferenciar entre diferentes clases de aceite en condiciones ideales. La mayoría de los fluoros sensores láser utilizados para la detección de aceite emplean un láser que opera en el ultravioleta entre 300 y 340 nm. A estas longitudes de onda de excitación, existe un amplio retorno fluorescente de materia orgánica, centrado en 420 nm.

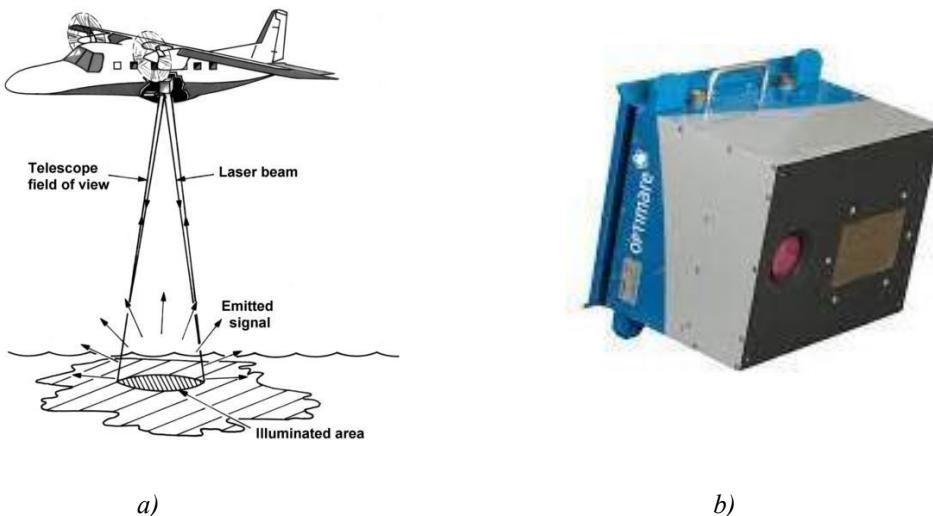


Figura 1.2.15 : a) Uso de los fluoro sensores láser. b) VIS Line scanner de la marca Optimare. Fuente: airborne-sensors, s.f.

1.2.5.2 Sensores de microondas pasivos:

El océano es un emisor de radiación de microondas. El petróleo en el océano es un fuerte emisor de radiación de microondas en comparación con el agua y, por lo tanto, aparece como un área "brillante" en un mar más oscuro. El agua tiene un factor de emisividad de 0,4, mientras que el aceite tiene un factor de emisividad de 0,8 (Ulaby et al., 1986). Un dispositivo pasivo puede detectar esta diferencia de emisividad y podría proporcionar un medio de detección de aceite. Además, hay un cambio en señal con espesor, por lo tanto, en teoría, el dispositivo podría usarse para medir el espesor de la mancha. Esta técnica no ha tenido mucho éxito.

Components of the Passive Microwave Signal

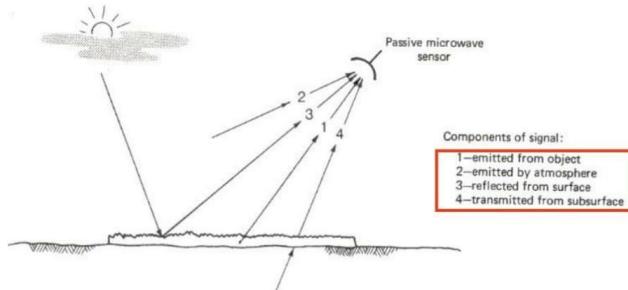


Figura 1.2.16: Sensores de microondas pasivos. Fuente: SlidePlayer (s.f.)

1.2.5.3 Fluorómetros sumergibles:

La detección flurométrica (FLD) se trata esencialmente de medir la fluorescencia en longitudes de onda predeterminadas, lo que significa que FLD no puede distinguir entre diferentes fuentes de hidrocarburos y compuestos fluorescentes, por ejemplo, petróleo y productos refinados de petróleo, procesos de combustión (por ejemplo, plantas de energía, marítimo y terrestre), a base de tráfico, incendios forestales). Los métodos de laboratorio específicos de compuestos, como la cromatografía de gases y la espectrometría de masas, pueden hacer tales distinciones, pero la facilidad de uso en el campo, la velocidad y los bajos costos de funcionamiento aún hacen que los protocolos de campo basados en FLD sean alternativas atractivas en comparación con las técnicas de laboratorio. En base a un experimento realizado se encontró que el C3 Submersible Fluorometer era una gran opción cuando está configurado adecuadamente. Se puede configurar con tres sensores ópticos que van desde el ultravioleta profundo hasta el espectro infrarrojo



Figura 1.2.17 : FLUORÓMETRO C3. Fuente: Turner Designs. (s. f.)

1.3. Formulación de propuesta de sistema mecatrónico:

En este capítulo se presenta y detalla la propuesta de solución que se ha planteado para resolver la problemática mencionada anteriormente. Posteriormente, se indican los objetivos principales y específicos que cumplen el sistema mecatrónico propuesto. Finalmente, se describe la metodología de trabajo empleada para la realización del sistema.

1.3.1. Propuesta de solución

A partir de la problemática enunciada, se propone el diseño e implementación de un sistema mecatrónico compuesto por 3 Vehículos Superficiales No tripulados (USV), que tiene la capacidad de desplazarse sobre superficies marítimas, mientras recolecta petróleo presente en el mar. En la parte delantera, hay 2 USV auxiliares que movilizan barreras flotantes de 7 metros de largo, con el objetivo de focalizar en un área pequeña los hidrocarburos y que la extracción sea más eficiente, además de ayudar a evitar que la mancha de petróleo se crezca y se disperse sobre el agua. La tarea de recolección del petróleo se realiza mediante un skimmer acoplado a un USV central y que está compuesto por tambores oleofílicos en los que se adhiere el hidrocarburo, mientras el fluido recolectado es transportado a un contenedor inflable ubicado en la parte posterior y acoplado al mismo USV.

1.3.2. Objetivos

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar e implementar un sistema teleoperado compuesto por 3 Vehículos Superficiales No tripulados (USV, por sus siglas en inglés) para limpiar y recolectar derrames de hidrocarburos presentes sobre la superficie de los mares.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar la estructura mecánica y el sistema electrónico de 2 USV auxiliares.
- Reacondicionar y acoplar el equipo de recolección de hidrocarburos en el USV
- Diseñar la red de comunicaciones entre los USV que componen al sistema, con el objetivo de coordinar y dirigir los movimientos superficiales del sistema en conjunto.
- Proponer estrategias de control de desplazamiento que permitan desplazar y dirigir a los vehículos que componen al sistema de manera coordinada.

- Seleccionar los materiales y componentes electrónicos con los que contará el sistema, y estimar los costos asociados a estos, así como, el costo de diseño y fabricación.

1.3.3. Requerimientos del sistema mecatrónico

A continuación, se presentan los requerimientos que debe cumplir el sistema, divididos en diferentes ámbitos como Geometría, Cinemática, requerimientos de Fuerzas, Energía, Materia, Señales de información de entrada y de salida, Control, Comunicaciones, entre otros.

Tabla 6. Lista de requerimientos

Fuente: Propia

Característica de diseño	Deseo o exigencia	Descripción	Responsable
Función Principal	E	El sistema cumple la función de focalizar el petróleo vertido en el mar con la ayuda de barreras flotantes para evitar que se extienda, mientras lo recolecta y separa del mar y luego lo almacena en un contenedor inflable.	Diego Loayza Manuel Soto Jose Bartra
Geometría			
	E	Volumen del Contenedor: 1000 galones o 3785 litros de petróleo	Francisco Meza
	E	Geometría máxima del transporte del contenedor: L : 7 m x A: 1.50m x H: 1.5 m	Francisco Meza José Bartra
	E	Simetría en la geometría del USV principal, de los auxiliares y la del elemento de succión (skimmer)	Diego Loayza José Bartra
Cinemática			
	E	Velocidad máxima: 100 cm/s	Manuel Soto
	E	Tasa máxima de remoción de petróleo: $20 \text{ m}^3 / \text{h}$. (Skimmer: TDS 118)	Carlos Contreras
Fuerzas			
	E	La estructura mecánica debe mantener su configuración bajo cualquier condición de fuerzas o impactos producidos por las olas.	Manuel Soto
	E	Estabilidad del sistema ante las olas y corrientes del mar	Carlos Contreras
Energía			
	E	El sistema debe tener una autonomía de 8 horas	Manuel Soto
	E	La fuente de energía de los componentes electrónicos será baterías de Polímero de Litio	Francisco Meza

Característica de diseño	Deseo o exigencia	Descripción	Responsable
	E	La fuente de energía del skimmer y la bomba de transporte será gasolina Diesel	Manuel Soto
Materia			
	E	Entrada: El petróleo ingresa al sistema utilizando un elemento de succión y viaja a través de una manguera hacia el contenedor	Francisco Meza
	E	Salida: Petróleo almacenado que será retirado del contenedor	Francisco Meza
Señales (Información)			
	E	Entradas: El sistema debe tener como señal de entrada el accionamiento del skimmer para realizar la operación de limpieza, las direcciones del movimiento de los USV mediante el control remoto .	Carlos Contreras
	E	Salidas: El sistema debe tener como señales de salida: su posición medida por GPS, la velocidad a la que viajan los USV (medida por un sensor de velocidad) y la dirección del desplazamiento sobre la superficie (medida por un sensor inercial)	Manuel Soto
Control			
	E	El sistema debe poder controlar su velocidad, dirección y su posición sobre la superficie del mar	Manuel Soto Diego Hanco
	E	El sistema debe contar con sensor de localización GPS	Manuel Soto Diego Hanco
	E	Cada USV del sistema debe incluir un módulo de comunicación inalámbrica por Radio Frecuencia (con antena) de un alcance mayor a 10 m.	Francisco Meza Diego Hanco
	E	Cada USV debe tener un microcontrolador que procese las señales de los módulos RF de comunicación inalámbrica, del sensor de dirección y el sensor de velocidad	Francisco Meza
Software			
	E	Programa que detecte la posición de los USV y el skimmer	Carlos Contreras
Comunicaciones			
	E	Los datos de monitoreo: posición de los USV, velocidad del sistema deben ser transmitidos al equipo terrestre por telemetría	Manuel Soto Diego Loayza Diego Hanco

Característica de diseño	Deseo o exigencia	Descripción	Responsable
	E	Los equipos de telemetría constan de una antena en el contenedor y una en la estación portable que transmite los datos a la tablet o laptop.	Manuel Soto Diego Loayza Diego Hanco
Seguridad			
	E	El contenedor debe ser regulado con el Reglamento de prevención contra la contaminación por aceite para evitar derrames.	Diego Loayza José Bartra
	E	No utilizar mecanismos de limpieza que afecten la flora y/o fauna del ecosistema	Diego Loayza José Bartra
Ergonomía			
	E	Facilidad en la portabilidad y uso del equipo terrestre que monitorea los procesos del sistema	Francisco Meza
	E	Los skimmers, contenedor y estación terrestre deben ser etiquetados con la información del equipo	Carlos Contreras
	E	No usar colores oscuros en la fabricación de los componentes para evitar confusión con el petróleo	Carlos Contreras
Fabricación			
	E	El material de fabricación de los cascos de los 3 USV será fibra de vidrio.	Diego Loayza
	E	El material de las estructuras de unión entre cascos será de Aluminio 6063 T-5.	Diego Loayza
Control de calidad			
	E	El contenedor debe cumplir las normas del Reglamento de prevención contra la contaminación por aceite.	Francisco Meza
	E	La geometría del USV debe cumplir con la norma ISO 8666	Diego Loayza José Bartra
	E	Cumplimiento de la norma IEC60529 Degrees of protection para los sistemas electrónicos	Carlos Contreras
	E	Cumplimiento de la Norma ISO 12944 para protección contra corrosión	Manuel Soto
	E	Cumplimiento de la Norma 14509 para regular ruido del motor	Francisco Meza
	E	Testear la velocidad de recolección del elemento de succión con el estándar ASTM F2709	Diego Loayza
Montaje			
	E	Skimmer montado al usv principal por medio de rieles	José Bartra

Característica de diseño	Deseo o exigencia	Descripción	Responsable
			Francisco Meza
	E	Los componentes electrónicos estarán montados en una caja electrónica usando soportes sujetados por tornillos.	Manuel Soto
	E	Durante el proceso de acople: los cascos y las barreras tendrán mecanismos para acoplarse entre ellos y moverse juntos.	José Bartra Diego Loayza
	E	Grado de hermeticidad de los componentes eléctricos de IP67	José Bartra Diego Loayza
Transporte			
	E	La estación en tierra será portátil (laptop o tablet con conexión a internet)	Manuel Soto
	E	Los componentes serán preensamblados y llevados a la playa en una camioneta para culminar con los ensambles mayores.	Carlos Contreras
Uso			
	E	El sistema debe operar con condiciones ambientales de 0°C a 70°C	Francisco Meza
Mantenimiento			
	E	Frecuencia de mantenimiento preventivo del sistema: 1 vez por mes	Manuel Soto
	E	Se requiere la limpieza de los equipos al finalizar la labor diaria	Carlos Contreras
Costos			
	E	Los costos de los materiales del proyecto estarán por debajo de S/. 3000.	Manuel Soto

1.4. Metodología de trabajo

La metodología a emplear será la Metodología de diseño VDI 2221. Esta norma fue creada por la Verein Deutscher Ingenieure (VDI) el cual sugiere un enfoque sistemático en donde el proceso de diseño se subdivide en 7 etapas. La primera etapa consiste en definir la tarea claramente y estará sujeto a cambios durante las posteriores etapas, en este caso sería buscar la solución a la contaminación de playas. La segunda etapa consiste en determinar las funciones requeridas del diseño y organizarlos en una estructura de funciones y subsistemas.

En la tercera etapa se realiza la búsqueda de soluciones para los subsistemas identificados y estos se combinan en una solución principal, previa evaluación técnica-económica. En la cuarta etapa, se divide la solución en módulos realizables como: mecánica, electrónica, control y comunicación. Para la quinta etapa, se realizan los bosquejos y diagramas preliminares de los módulos. En la sexta etapa se culmina con los bosquejos de los módulos. Para finalizar, en la séptima etapa se documenta y prueba, mediante simulaciones para este trabajo, el producto final.

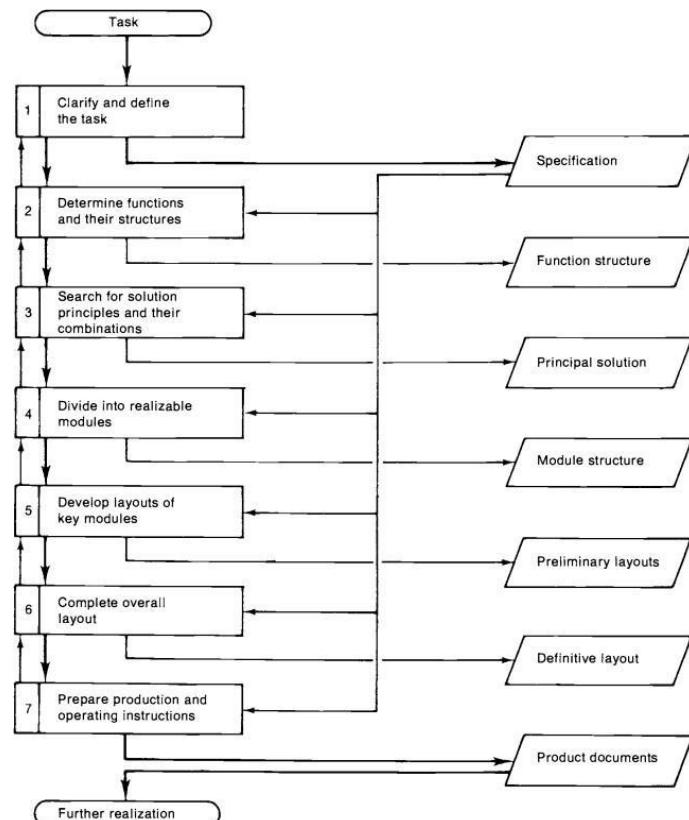


Figura 1.3.1: Guía VDI 2221

Fuente: (Cross, 2008)

2.0. CAPÍTULO 2: DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO

2.1. Presentación del sistema mecatrónico integrado

El presente sistema mecatrónico cuenta con un USV principal y 2 USV auxiliares. El principal es el encargado de recibir las señales de tierra en caso de teleoperación o de controlar todo el proceso de navegación autónoma. Además, sobre este va montado un skimmer para succionar el petróleo, un Power Pack, 2 barreras y un contenedor para petróleo. En los USV auxiliares van montadas dos barreras para contener el petróleo en esa zona y a la vez van siendo llevadas por este.

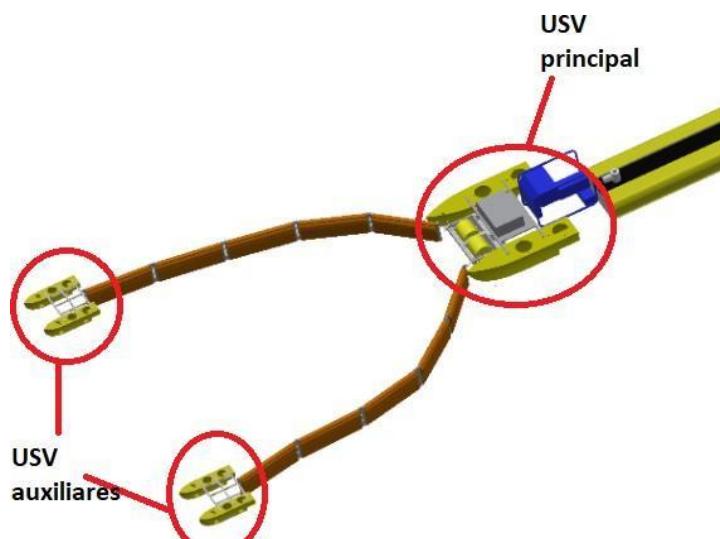


Figura 2.1: Vista general del sistema mecatrónico
Fuente: Propia

2.2. Presentación del sistema eléctrico - electrónico

En esta sección se presentan los componentes eléctricos-electrónicos de los USV auxiliares.

2.2.1. Diagrama de bloques- USV auxiliar

En la figura 2.2 se muestra el diagrama de bloques de los USV auxiliares en donde se puede apreciar las conexiones, voltajes de alimentación y el tipo de información que recibe cada componente electrónico. Como se aprecia, el sistema está compuesto de módulos de energía , de potencia y de control y sensado, los cuales están energizados por una batería de 14,8VDC del tipo Polímero de Litio (LiPo) y otra de 9VDC, donde la primera será la encargada de energizar los propulsores del USV auxiliar y la segunda de energizar los componentes electrónicos. El encendido del sistema se realiza mediante un botón de Inicio, de color verde y que acciona un relé que permite la alimentacion del modulo de potencia y de control. Además se cuenta con un pulsador de emergencia, de color rojo, que al accionarse, desconecta las baterias y desenergiza el sistema. El módulo de potencia de cada USV auxiliar se compone de 2 propulsores (thrusters) Brushless DC, que permitirán el desplazamiento y direccionamiento del USV sobre la superficie del agua, además de los respectivos controladores de velocidad ESC, que permiten variar la velocidad de los thrusters. Finalmente, se cuenta con un módulo de control y sensado, que permite controlar la energía que se entrega a los propulsores y en consecuencia, controlar la velocidad de cada USV auxiliar y el direccionamiento horizontal sobre la superficie del agua, además de que permite sensar los datos de la orientación , aceleración y velocidad del USV auxiliar, mediante una unidad de medición inercial (IMU), y de la ubicación del sistema mediante un sensor GPS; y como función adicional, este módulo cuenta con un chip de comunicación por radiofrecuencia (RF), que permite enviar los datos censados hacia el USV principal y recibir comandos sobre el direccionamiento del USV auxiliar (avanzar, retroceder, girar) del USV principal.

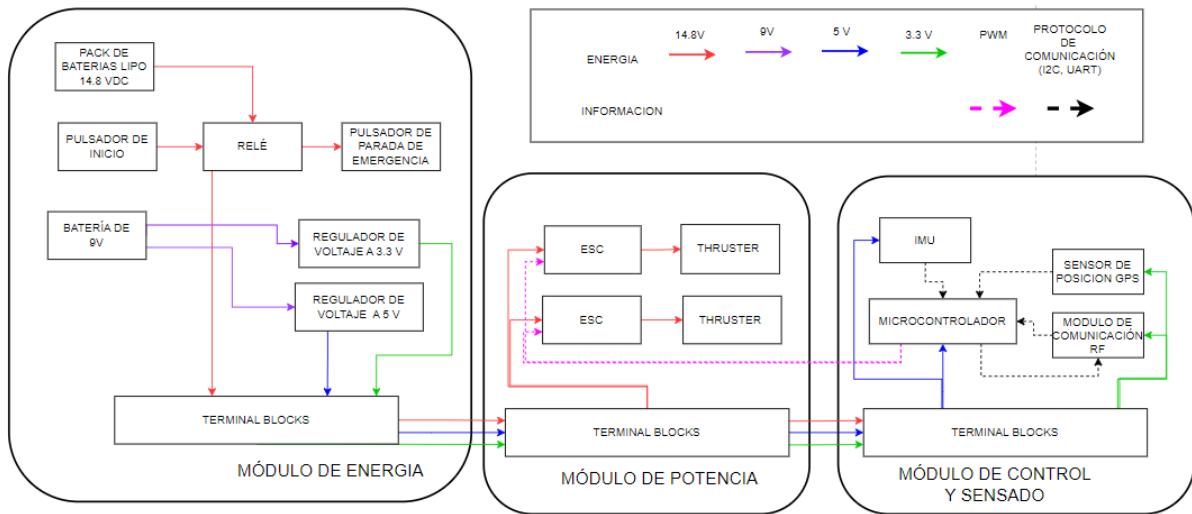


Figura 2.2 - Diagrama de bloques de un USV auxiliar

Fuente: Propia

En la figura 2.3 se muestra el diagrama eléctrico de alimentación de los USV auxiliares en donde se puede apreciar las conexiones y el conjunto de baterías a emplear para alimentar al sistema

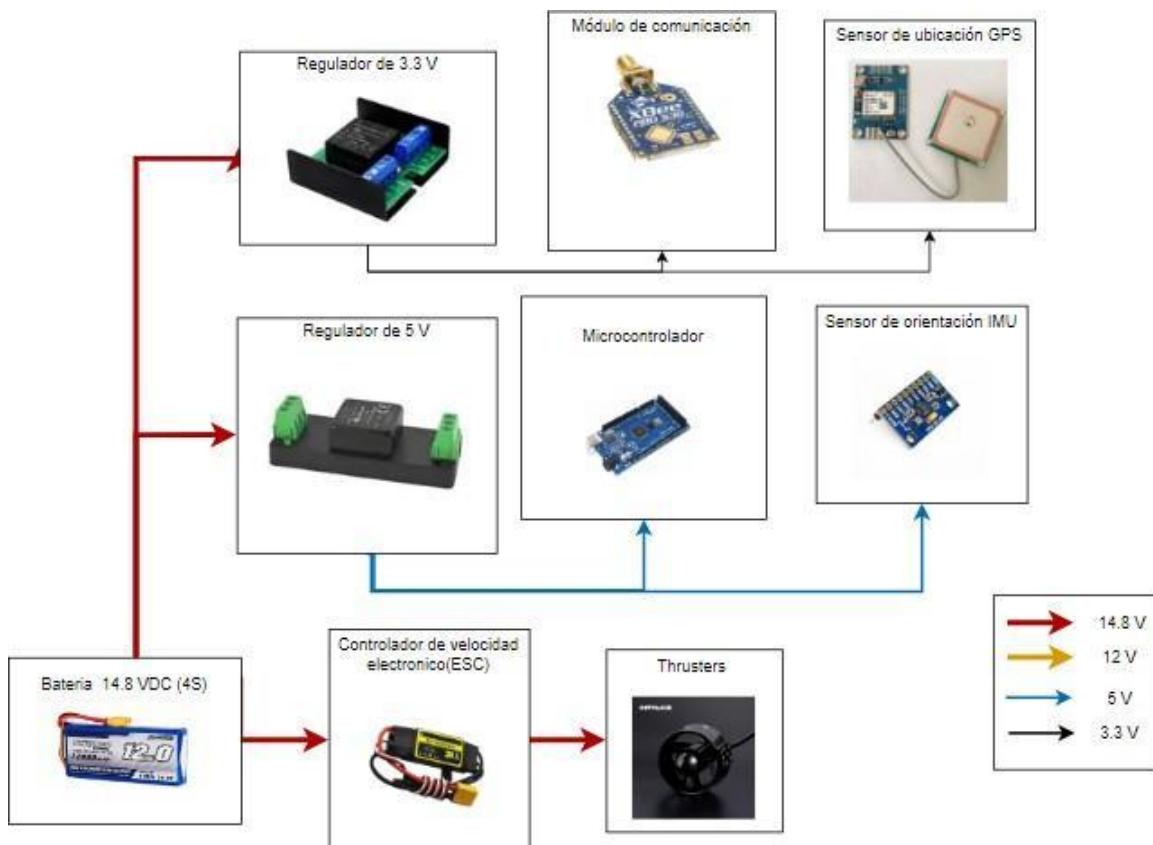


Figura 2.3 - Diagrama eléctrico de alimentación de los USV auxiliares

Fuente: Propia

En la figura 2.4 se presenta el diagrama electrónico de señales de los USV auxiliares en donde se aprecia los diferentes protocolos de comunicación: I2C y UART. Además, se observa las señales PWM como salida del microcontrolador y entrada del driver del motor.

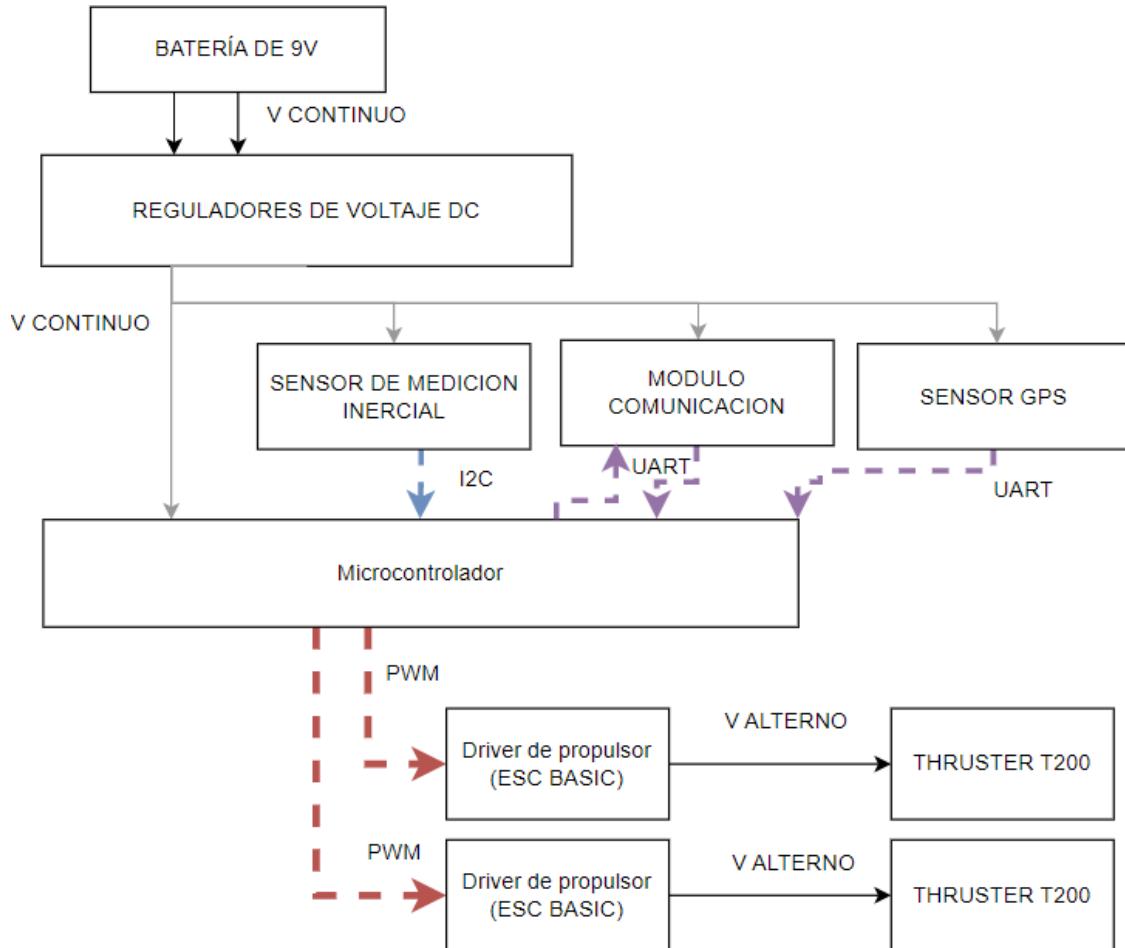


Figura 2.4 - Diagrama electrónico de señales de los USV auxiliares

Fuente: Propia

Con el objetivo de reducir el peso de los USV auxiliares se ha optado por colocar dentro de los cascos a los componentes de control y sensado, así como los packs de baterías, de manera que la sujeción se realice mediante soportes y estructuras fabricadas en impresión 3D de material PLA.

2.2.2. Descripción de los componentes electrónicos del USV auxiliar

A continuación se describen las características principales de los componentes electrónicos que conforman el USV auxiliar, según formen parte de los módulos de energía, potencia o de control y sensado.

2.2.2.1. Módulo de energía

Este módulo permite energizar los diferentes componentes del sistema. Estos componentes se encuentran fijos en caja electrónica fabricada en impresión 3D, la cual está ubicada dentro de los cascos de los USV auxiliares y sujetadas mediante pernos M6, arandelas de presión y planchas de caucho, todo ello para garantizar la correcta hermeticidad en el interior.

2.2.2.1.1. Batería de polímero de litio

Las baterías de litio son comúnmente usadas en dispositivos electrónicos médicos, celulares , tablets y computadoras respecto a otros tipos de baterías eléctricas recargables, principalmente debido a sus ventajas como son la alta densidad de energía, reducido tamaño y peso, alta eficiencia energética y su prolongado tiempo de vida útil.

En este sistema se utilizará un conjunto de 4 baterías LiPo de la marca Turnigy.

Tabla 2.1 - Especificaciones de la batería

Fuente: Turnigy

Marca	Turnigy
Modelo	High Capacity 20000mAh 4S 12C
Capacidad	20 Ah
Voltaje Nominal	14.8 V
Constante de descarga	12 C
Dimensiones	202 x 93 x 47mm
Peso	1775 g



2.2.2.1.2. Convertidor aislado DC/DC Reductor de tensión

Los convertidores CC-CC aislados poseen un transformador de manera interna lo que permite el aislamiento eléctrico de la entrada de la fuente de alimentación respecto de la salida y son útiles para separar las partes de un circuito que son sensibles al ruido de las fuentes de ese ruido.

Para este sistema, se usan 2 reguladores aislados que transforman el voltaje de 14.8 V a 5 V y 3.3 V.

Tabla 2.2 - Especificaciones del convertidor 3.3V

Fuente: Mouser

Marca	CUI Inc
Modelo	PDQE10-Q24-S5-T
Potencia de salida:	20 W
Tensión de entrada, máx.:	36 V
Voltaje de salida-Canal 1:	3.3 V
Temperatura de trabajo máxima:	+105 °C
Dimensiones	55 x 52.3 x 19 mm
Corriente de salida-Canal 1:	5 A



Tabla 2.3- Especificaciones del convertidor 5V

Fuente: Mouser

Marca	CUI Inc
Modelo	PDQE10-Q24-S5-T
Potencia de salida:	10 W
Tensión de entrada, máx.:	36 V
Voltaje de salida-Canal 1:	5 V
Temperatura de trabajo máxima:	+85 °C
Dimensiones	76 x 31.3 x 21mm



2.2.2.2. Módulo de potencia

2.2.2.2.1. Propulsor Brushless DC (BLDC)

Este tipo de propulsores tiene un motor CC sin escobillas son motores síncronos de imán que se conmuta eléctricamente en ciertas posiciones y no funciona directamente a partir de una fuente de tensión CC, pero su funcionamiento es similar a un motor de CC. Estos motores son ampliamente usados en robots y drones submarinos diseñados para inspeccionar y explorar superficies submarinas.

Tabla 2.4- Especificaciones del convertidor 5V

Fuente: Mouser

Marca	Blue Robotics
Modelo	T200
Empuje total (a 20 V)	5.05 kgf
Voltaje de operación	7 - 20V
Corriente de consumo (a 20V)	32 A
Temperatura de trabajo máxima:	+85 °C
Dimensiones	113 x 100.3 mm



2.2.2.2.1. Controlador de velocidad Electrónico (ESC)

Controlador de propulsores Brushless trifásicos que permite la rotación de las propelas en un sentido y en sentido contrario, originando una fuerza de empuje hacia adelante y en reversa. El control se realiza mediante la activación de un conjunto específico de MOSFETS de potencia, de manera que mientras más rápida es la commutación, el propulsor gira más rápido.

Tabla 2.5 - Especificaciones del controlador de velocidad

Fuente: Blue Robotics

Marca	Blue Robotics
Modelo	Basic ESC
Voltaje de operación	7 - 26 V
Corriente máxima (a 20V)	30 A
Temperatura de trabajo máxima:	+85 °C
Voltaje señal PWM	3.3 - 5 V
Dimensiones	113 x 100.3 mm
Peso	16.3 g



2.2.2.3. Módulo de control y sensado

2.2.2.3.1. Arduino UNO R3

Es una plataforma electrónica de hardware compuesta por periféricos como luces y puertos USB y un microcontrolador ATMega programable mediante un Entorno de Desarrollo Gráfico. En esta aplicación se emplea para controlar el direccionamiento de los USV auxiliares, así como para recibir las órdenes del USV principal y transmitir a este último los datos medidos por los sensores.

Tabla 2.6 - Especificaciones del controlador

Fuente: Arduino

Marca	Arduino
Modelo	UNO R3
Microcontrolador	ATmega328P
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada nominal	7 - 12 V
Pines digitales	14
Pines analogicos	36
Memoria Flash	32 KB
Memoria SRAM	2 KB
Memoria EEPROM	1 KB
Velocidad de reloj	16 MHz
Interfaces de comunicación	SPI, I2C , UART



2.2.2.3.1.Unidad de medición inercial (IMU)

Una unidad de medición inercial permite obtener datos de posición, orientación y velocidad de un objeto, pues contiene 3 tipos de sensores: giroscopio, acelerómetro y magnetómetro. Para cada USV auxiliar se emplean 1 IMU MPU 9250.

Tabla 2.7 - Especificaciones del MPU 9250

Fuente: Blue Robotics

Marca	Sparkfun
Modelo	MPU-9250
Voltaje de alimentación	2.4 - 3.6 V

Corriente máxima	100 mA
Límites de operación máximos:	Giroscopio: 20000 °/s Acelerómetro: +- 16g Magnetómetro: 4800 uT
Voltaje señal PWM	3.3 - 5 V
Interfase de comunicación	SPI, I2C
Dimensiones	50 x 50 x 7 mm
Peso	10 g



2.2.2.3.1. Sensor de posición GPS

Son sistemas que permiten localizar cualquier objeto sobre la superficie de la Tierra con una precisión de metros o incluso centímetros. Se utilizan para realizar análisis de la trayectoria de un vehículo terrestre o aéreo.

Tabla 2.8 - Especificaciones del GPS Neo-6M
Fuente: Blue Robotics

Marca	U-blox
Modelo	GPS Neo 6M
Voltaje de alimentación	0.5 - 3.6 V
Corriente máxima	100 mA
Número de canales	50 canales
Tasa de actualización de navegación máxima	5 Hz
Precisión de posición horizontal	2.5 m
Interfase de comunicación	SPI, UART
Dimensiones	80 x 80 x 7 mm
Peso	20 g



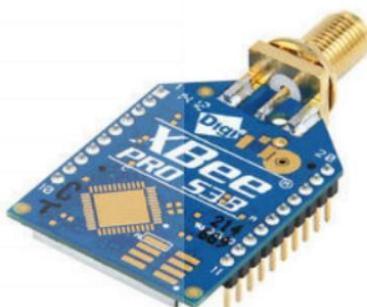
2.2.2.3.1. Módulo de comunicación Radio Frecuencia

Los dispositivos de comunicación por RF son las tarjetas de radio comunicación más utilizadas para diferentes aplicaciones en las que se necesita alta inmunidad al ruido y cuando se quiere garantía de que el paquete de datos ha sido enviado. Existen diferentes protocolos de comunicación por RF como Wifi, Bluetooth y Zigbee.

Tabla 2.9 - Especificaciones del módulo de comunicación RF

Fuente: Blue Robotics

Marca	Xbee
Modelo	Xbee Pro 900 HP (S3B)
Voltaje de alimentación	2.4 - 3.6 V
Corriente máxima	26 mA
Protocolo de comunicación	Digimesh
Banda de frecuencias	902 - 928 MHz
Tasa de datos RF	10 o 200 Kbps
Interfase de comunicación	SPI, UART(3V)



2.3. Presentación del sistema mecánico

El desarrollo del diseño mecánico se enfoca en realizar las uniones entre los diversos elementos que posee el sistema propuesto. En la Figura 2.3.1, se puede observar la unión entre las barreras y los USV auxiliares; la unión entre el Oil Skimmer con los cascos del USV principal y las barreras; el montaje del power pack y la caja electrónica; y la unión entre la vejiga (almacénador del petróleo recolectado) y el USV principal

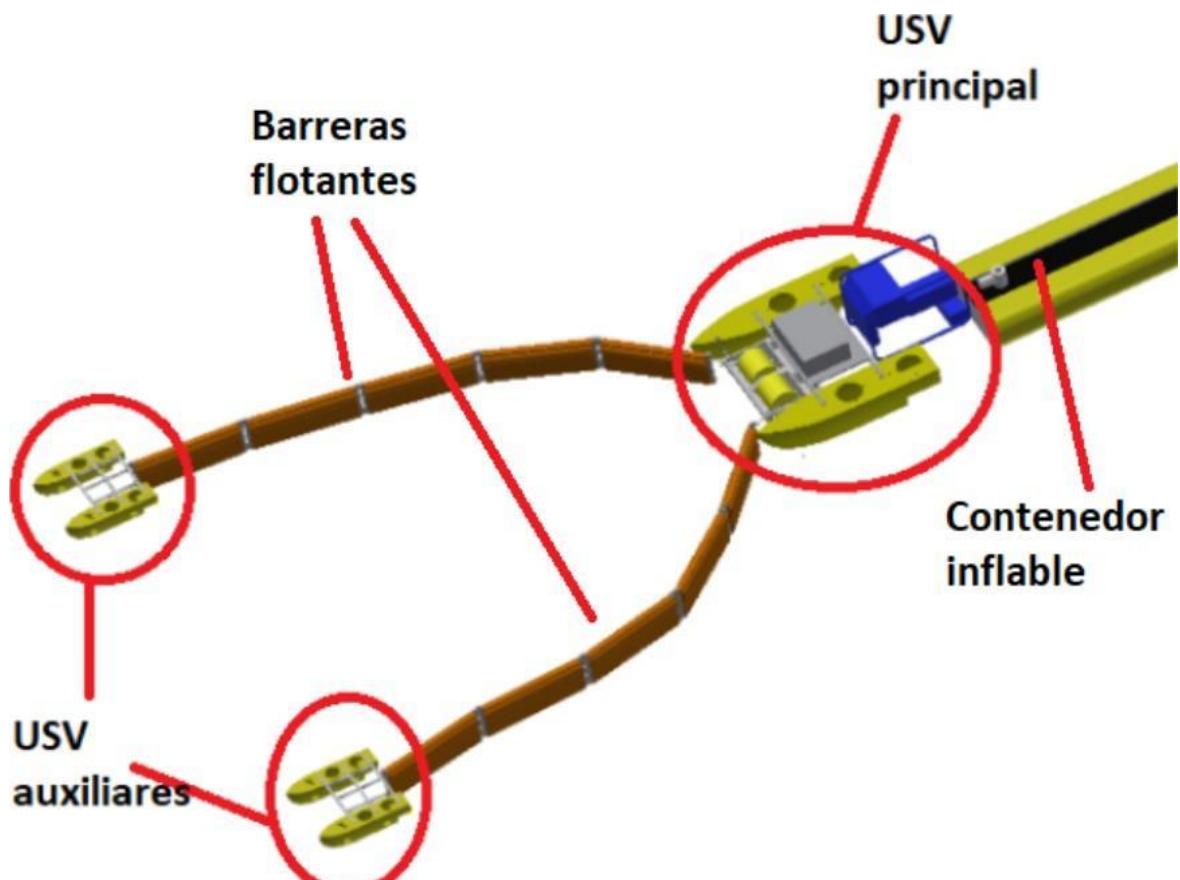


Figura 2.3.1. Sistema recolector de hidrocarburos

Fuente: Propia

En la Figura 2.3.2 se muestra el diseño de la unión entre el skimmer del USV principal y las barreras de contención de petróleo. Como se observa, se colocan planchas de caucho para lograr que el aceite ingrese completamente a los tambores y evitar que se filtre por los lados de la carcasa del skimmer. De igual manera se puede apreciar un “cortador de aceite” el cual se emperna al Oil Skimmer y de este modo evita que el aceite pase por entre los tambores, conduciendo el aceite del centro hacia los tambores y no hacia atrás del Oil Skimmer.

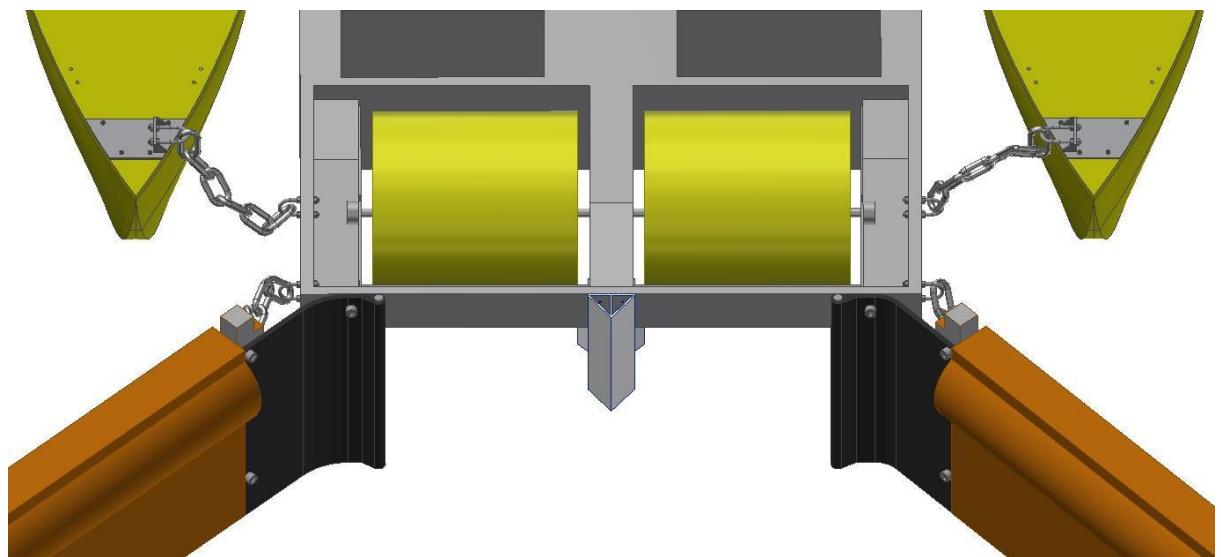


Figura 2.3.2. Skimmer unido a barreras y USV principal (se evita que el aceite pase por detrás del oil skimmer)

Fuente: Propia

La Figura 2.3.3 muestra el diseño de la unión del skimmer hacia los cascos del USV principal. La unión se realiza por cadenas, las cuales se sujetan por medio de una placa de metal atornillada al casco y un U-bolt colocado en posición horizontal.



Figura 2.3.3. Unión skimmer - casco der. USV principal

Fuente: Propia

La figura 2.3.4 muestra el diseño final del USV auxiliar montado junto con los perfiles V-Slots, U bolts, placas, placas en T, una cadena que une a la barrera por la parte posterior y otra cadena que va hacia el VSlot del centro, para evitar de este modo que el USV puede

levantarse al avanzar. En la parte posterior de los cascos se encuentran los T200 que cuentan con Penetrators y Conectores que aseguran la conexión del propulsor e impiden el paso del agua.

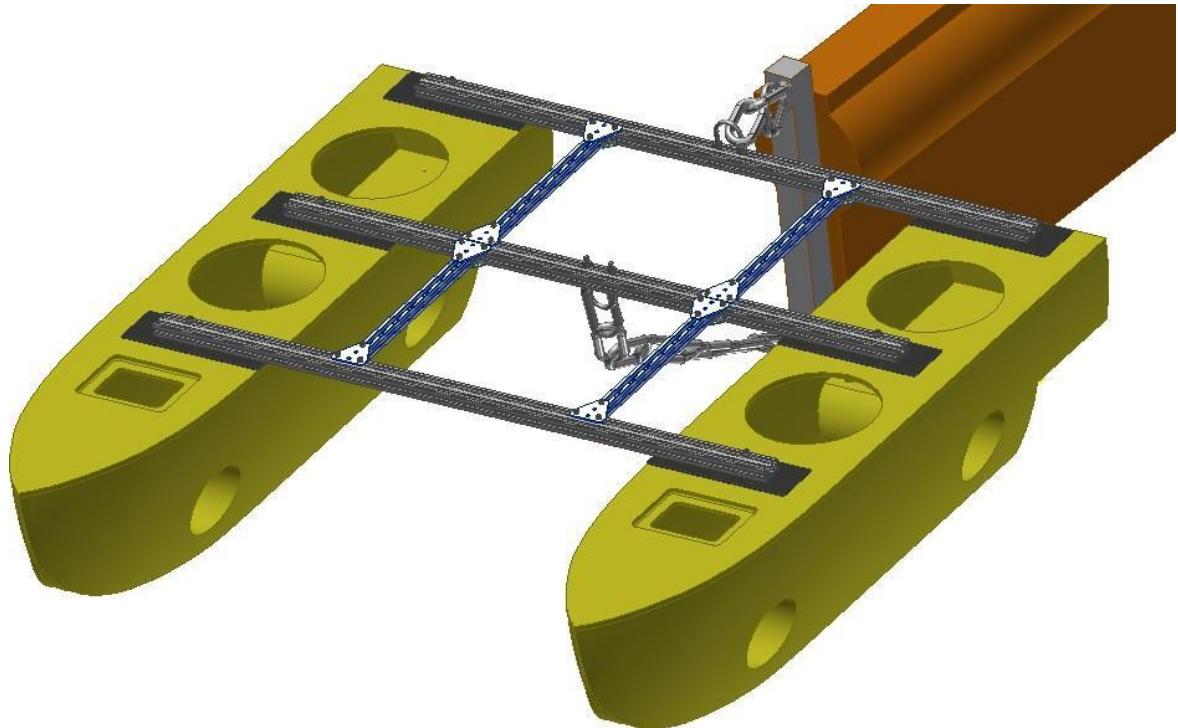


Figura 2.3.4. Ensamble final del USV Auxiliar
Fuente: Propia

2.4. Presentación del sistema de control

En esta sección se presenta el planteamiento del problema, el desarrollo teórico y modelamiento matemático del sistema en conjunto, y el diseño del algoritmo de control que permitirá mantener una formación triangular para los 3 USV mientras se desplazan sobre el agua.

La principal motivación del desarrollo de este control de formación es lograr mantener una distancia adecuada entre el USV principal y cada USV auxiliar, de manera que las barreras de contención de petróleo que unen a ambos no estén muy tensionadas, lo cual puede representar una fuerza de arrastre adicional que dificulte el desplazamiento de los USV auxiliares. Para que se pueda mantener un patrón de formación deseado entre más de 2 vehículos de superficie,

Existen diferentes enfoques y estrategias que abordan el problema de control de formación, entre las cuales se tienen, según Chen, Wang (2005), el enfoque basado en comportamientos y campo potencial, la estrategia líder seguidor, el método de coordenadas generalizadas, el método de la estructura virtual, entre otras. La primera estrategia considera que cada agente o robot posee un comportamiento complejo, y corrige sus acciones mediante vínculos sensorio-motores, es decir, los valores deseados de comportamiento se generan a partir de entradas sensoriales, las cuales pasan por esquemas motores que asocian comportamientos a cada robot y generan como salida una acción o vector que define cómo y en qué dirección debe moverse el robot. La estrategia de líder-seguidor plantea 2 tipos de controladores de formación: el primero es el control ' $l - \alpha$ ', que tiene como objetivo mantener una longitud y un ángulo relativo deseado entre el robot líder y el robot seguidor; mientras que el segundo controlador se denomina ' $l - l'$ ', que garantiza que un seguidor mantenga una longitud deseada entre este y 2 robots líderes. El método de coordenadas generalizadas especifica la trayectoria de toda la formación con el uso de las denominadas coordenadas generalizadas que definen a cada robot mediante su posición L, su orientación O y su forma S, de manera que permite controlar al conjunto como una sola entidad. El método de la estructura virtual controla a un grupo de robots a que se comporten como si fueran partículas que componen una estructura rígida que no existe físicamente. En este proyecto, se utiliza la estrategia líder seguidor propuesta por Durand, Jose (2016) y planteada en el libro Autonomous Robots, del autor Farhod Fahimi (2009), la cual es la que mejor se adecúa a nuestro sistema, debido a que el USV principal es controlado por teleoperación y se comporta de esta manera como el robot líder y los auxiliares toman el papel de seguidores.

Para el diseño del controlador primero se tiene que desarrollar el modelo cinemático y dinámico de una embarcación superficial. El movimiento completo de un vehículo superficial requiere de un modelo dinámico de 6 Grados de Libertad , sin embargo se utiliza comúnmente y por simplicidad el modelo dinámico de 3 Grados de Libertad, el cual se presenta a continuación, y que se obtiene asumiendo que la variación de los Grados de Libertad angulares en el espacio es pequeña.

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= \frac{1}{m_{11}}(f_x + F \cos \psi), \\ \ddot{y} &= \frac{1}{m_{22}}(f_y + F \sin \psi), \\ \ddot{\psi} &= \frac{1}{I_{zz}}(f_\psi + T),\end{aligned}$$

donde u, v son los componentes de velocidad en un sistema de coordenadas que se mueve junto al USV, como se muestra en la Figura 2.4.1; el vector x, y , es la posición del USV respecto al sistema global inmóvil (fijo a tierra) XY y el ángulo ψ es la orientación del eje longitudinal móvil del USV respecto al sistema de referencia global. Además, la fuerza de propulsión F y el torque de dirección T (Figura 2.4.1) son las entradas de control al modelo matemático de un USV, pues el robot es subactuado (solo posee actuadores o propulsores para movimiento en el eje longitudinal, pero no permiten movimiento en su eje lateral).

Por último, m_d es la masa agregada del vehículo, d_{ij}

es el coeficiente de amortiguamiento hidrodinámico, I_{zz} es el momento de inercia respecto a un eje vertical, y las componentes de fuerzas, velocidades relativas y masas son

$$\begin{aligned}f_x &= m_r d_{22} v \sin \psi - d_{11} u \cos \psi + \dot{\psi}(v \cos \psi - m_r u \sin \psi)m_d, \\ f_y &= -m_r d_{22} v \cos \psi - d_{11} u \sin \psi + \dot{\psi}(v \sin \psi + m_r u \cos \psi)m_d, \\ f_\psi &= -m_d u v - d_{33} \dot{\psi}, \\ u &= \dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi, \\ v &= -\dot{x} \sin \psi + \dot{y} \cos \psi,\end{aligned}$$

$$m_d = m_{22} - m_{11},$$

$$m_r = \frac{m_{11}}{m_{22}}.$$

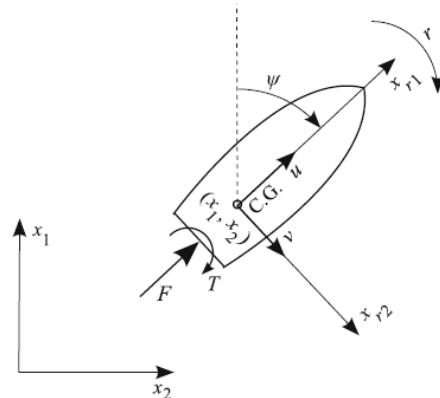


Figura 2.4.1: Esquema del movimiento de un USV (Fahimi. 2009)

2.4.1. Diseño del controlador ' $l - \alpha$ '

En el presente proyecto se utiliza 2 controladores ' $l - \alpha$ ' para controlar el movimiento de ambos USV auxiliares. Este control consiste en mantener una formación cualquiera de 2 robots, forzando a que el robot 2 o seguidor mantenga una distancia deseada l^d y un ángulo deseado α^d respecto al robot líder, como se muestra en la Figura 2.4.2. Las salidas del

controlador serán la fuerza de propulsión F_2 y el torque de dirección T_2 del robot seguidor, mientras que las entradas serán la longitud l_{12} y el ángulo α_{12} entre líder y seguidor, que se miden y calculan en cada instante para ambos USV, utilizando los sensores de posición GPS y el sensor inercial IMU respectivamente.

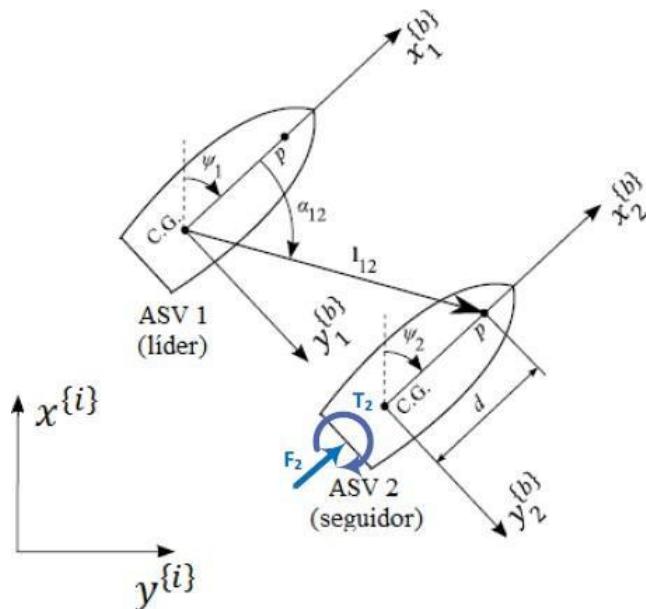


Figura 2.4.2: Esquema del controlador ' $l - \alpha$ ' (Fahimi. 2009)

A continuación, se presenta el modelo dinámico del sistema general en conjunto considerando la formación líder-seguidor, que se obtiene planteando el modelo dinámico para el USV seguidor (auxiliar) y relacionando la distancia y el ángulo relativo en función de las aceleraciones globales x, y de cada USV.

$$\begin{aligned}\ddot{l}_{12} &= \left[f_l + \frac{1}{m_{11}} F_2 \cos \gamma_1 + \frac{1}{I_{zz}} T_2 d \sin \gamma_1 \right], \\ \ddot{\alpha}_{12} &= \frac{1}{l_{12}} \left[f_\alpha - \frac{1}{m_{11}} F_2 \sin \gamma_1 + \frac{1}{I_{zz}} T_2 d \cos \gamma_1 \right],\end{aligned}$$

donde:

$$\begin{aligned} f_l &= \frac{1}{m_{11}}(f_x \cos \alpha_0 + f_y \sin \alpha_0) + \frac{1}{I_{zz}} f_\psi d \sin \gamma_1 - \ddot{x}_1 \cos \alpha_0 - \ddot{y}_1 \sin \alpha_0 \\ &\quad - d\dot{\psi}_2^2 \cos \gamma_1 + l_{12}\dot{\alpha}_0^2, \\ f_\alpha &= 7 \frac{1}{m_{11}}(-f_x \sin \alpha_0 + f_y \cos \alpha_0) + \frac{1}{I_{zz}} f_\psi d \cos \gamma_1 + \ddot{x}_1 \sin \alpha_0 - \ddot{y}_1 \cos \alpha_0 \\ &\quad + d\dot{\psi}_2^2 \sin \gamma_1 - 2l_{12}\dot{\alpha}_0 - l_{12}\ddot{\psi}_1. \end{aligned}$$

Estas ecuaciones también se pueden escribir en forma de matrices:

$$\ddot{\mathbf{z}} = \mathbf{f} + \mathbf{bu},$$

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} l_{12} \\ \alpha_{12} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_l \\ f_\alpha \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \frac{\cos \gamma_1}{m_{11}} & \frac{d \sin \gamma_1}{I_{zz}} \\ -\frac{\sin \gamma_1}{m_{11}l_{12}} & \frac{d \cos \gamma_1}{I_{zz}l_{12}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} F_2 \\ T_2 \end{bmatrix}.$$

Habiendo realizado el modelo, Fahimi (2009) propone una ley de control lineal, pues a diferencia de las leyes de control lineales obtenidas para modelos matemáticos linealizados respecto a un punto de operación, los controladores no lineales permiten trabajar en todo el rango de movimiento del USV.

Primero se definen los errores de las salidas:

$$\tilde{z}_1 = l_{12} - l_{12}^d, \quad \tilde{z}_2 = \alpha_{12} - \alpha_{12}^d.$$

Se quiere un sistema críticamente amortiguado para la dinámica del error Z , el cual se obtiene con la siguiente ecuación propuesta por Fahimi:

$$\ddot{\tilde{z}}_i + 2\sqrt{k_i(\tilde{z}_i)}\dot{\tilde{z}}_i + k_i(\tilde{z}_i)\tilde{z}_i = 0, \quad i = 1, 2,$$

en donde:

$$k_i(\tilde{z}_i) = n\lambda_i + (1-n)\frac{\lambda_i^2}{\lambda_i + a_i\tilde{z}_i^2},$$

pues esta dinámica muestra una convergencia suave cuando k es pequeño y se debe cumplir

que $\lambda_i > 0$, $n \ll 1$, $a_i > 0$.

Entonces se tiene la dinámica deseada del error:

$$\ddot{\tilde{\mathbf{z}}} + 2\sqrt{\mathbf{K}}\dot{\tilde{\mathbf{z}}} + \mathbf{K}\tilde{\mathbf{z}} = \mathbf{0},$$

donde

$$\sqrt{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} \sqrt{k_1} & 0 \\ 0 & \sqrt{k_2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}$$

Posteriormente, se reemplaza la aceleración del error $\ddot{\mathbf{z}}$ en el modelo matemático del sistema líder-seguidor

$$\ddot{\mathbf{z}} = \mathbf{f} + \mathbf{b}\mathbf{u}$$

Finalmente, se despeja la señal de control \mathbf{u} y se obtiene un controlador no lineal que forzará a las variables de error \mathbf{z} a converger al valor de cero.

$$\mathbf{u} = \mathbf{b}^{-1}(\ddot{\mathbf{z}}^d - 2\sqrt{\mathbf{K}}\dot{\mathbf{z}} - \mathbf{K}\mathbf{z} - \mathbf{f}).$$

A continuación, se presentan los bloques de simulación utilizados para probar el funcionamiento del controlador en Matlab. En la Figura 2.4.3 se muestra el controlador de seguimiento de trayectorias, empleado únicamente para controlar el movimiento del USV líder (principal)

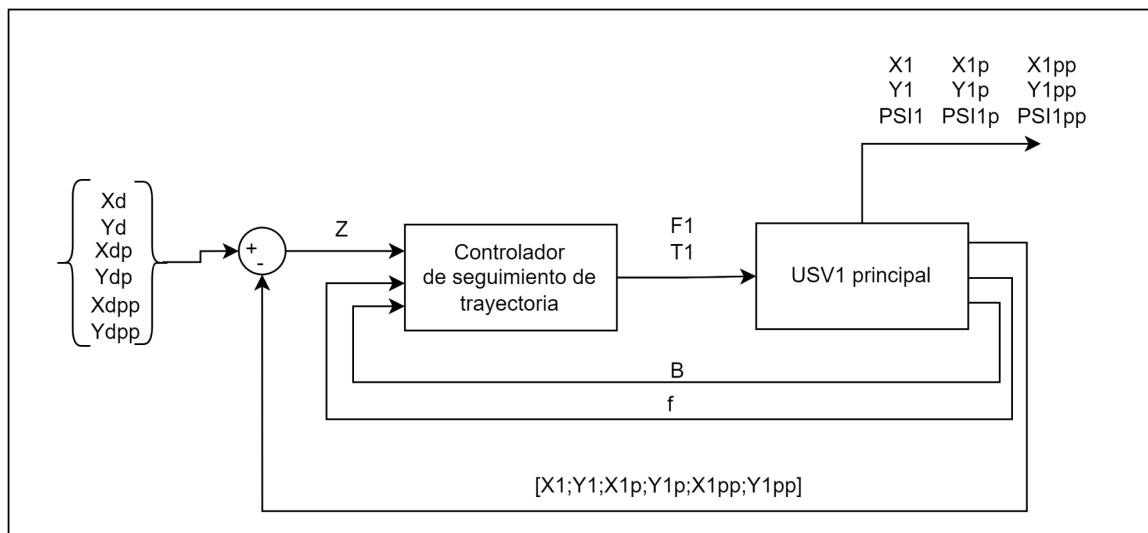


Figura 2.4.3: Controlador de seguimiento de trayectoria para USV principal 1
Fuente: Propia

En las Figuras 2.4.4 y 2.4.5 se observan los bloques de simulación del controlador ' $l - \alpha$ ' diseñado para cada USV auxiliar. Los resultados obtenidos se muestran en la sección 3.2: Informe de resultados de simulaciones realizadas

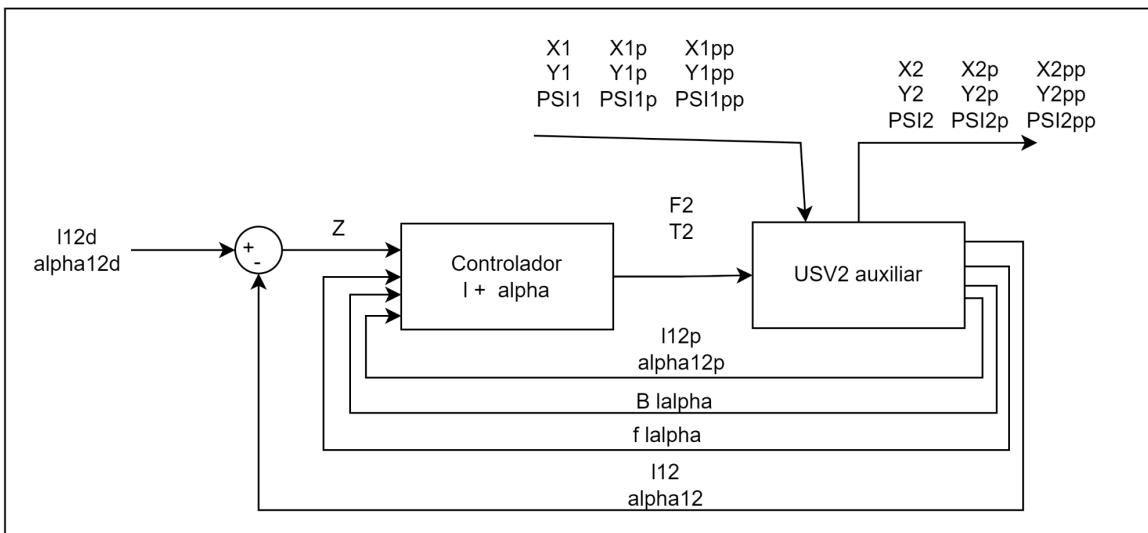


Figura 2.4.4: Controlador $l+\alpha$ para el USV auxiliar 2

Fuente: Propia

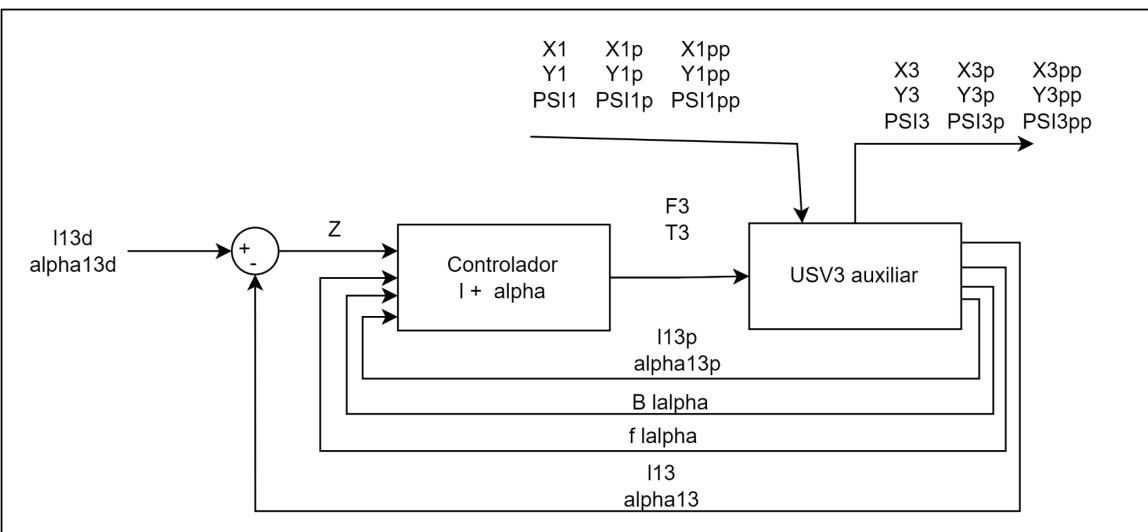


Figura 2.4.5: Controlador $l+\alpha$ para el USV auxiliar 3

Fuente: Propia

2.5. Costos para fabricación y compras

La lista siguiente es de componentes a adquirir para la implementación de los 2 USV auxiliares :

Tabla 2.5.1. Lista de componentes a adquirir
Fuente: Propia

Materiales	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total USD	Proveedor
COMPONENTES ELECTRÓNICOS				PROVEEDOR
ARDUINO UNO R3	2	\$24.36	\$48.72	Creatividad Ahora
MÓDULO IMU MPU9250: ACELERÓMETRO, GIROSCOPIO, MAGNETÓMETRO #SKU: 000214	3	\$14.10	\$42.31	
ANTENA 900 MHZ 3dBi	3	\$6.41	\$19.23	
XBee USB Adapter con cable	3	\$20.51	\$61.53	
Xbee USB Explorer USB	1	\$0.51	\$2.56	
Pack 2 XBee socket 2mm 10 pines	10			
Regulador DC- DC CUI 5V Convertidores aislados CC/CC 10W 9-36 Vin 5V 2000mA Reg Chassis Código: 490-PDQE10-Q24-S5-T	4	\$29.64	\$118.54	Mouser Electronics
Regulador DC- DC CUI 3.3V Convertidores aislados CC/CC dc-dc isolated, 9~36 Vdc input, 3.3 Vdc, 5 A, single regulated output Código: 490-PDQE20-Q24-S3-U	4	\$53.02	\$212.07	
Bloques terminales 10MM Código: 571-1776293-1	15	\$1.13	\$16.88	
Capacitores cerámicos de capas múltiples 0.01 uF 50 VDC nº: 581-SA105C103K	20	\$0.50	\$10.00	
Rocker Switches Carling Technologies IP68	5	\$17.25	\$86.23	
Relés universales 12V 50A 1 Coil 100mW TV-20	5	\$13.83	\$69.14	
Interruptores de paquete en línea dual (DIP)	5	\$0.59	\$2.95	
Zigbee Development Tools - 802.15.4 XBee Wireless Connectivity Kit	2			
Costo de envío Mouser	1	45	45	
Cable para propulsores por metro	6	\$15.00	\$90.00	BlueRobotics
Set de propelas amarillas	4	\$8.00	\$32.00	
Propulsor T200	4	\$190.00	\$760.00	
ESC Controlador de propulsores	4	\$36.00	\$144.00	

Wetlink Penetrator M14 WLP-M14-9.5MM-LC	8	\$16.00	\$128.00	
Sellos para Penetrator 9.5mm- Pack 10 und	1	\$18.00	\$18.00	
O-rings Spare Bulkhead- set 10 pzas M14	2	\$4.00	\$8.00	
Mounting Bracket	4	\$36.00	\$144.00	
Costo de envio	1	\$92.00	\$92.00	
Módulo GPS NEO 8M u Blox	3	\$23.00	\$69.00	JOSLIN PERÚ
Lipo Pack 20000mAh 4S 12C	4	\$142.00	\$568.00	
IMAX B6 AC-V2 cargador / descargador de 1-6 células	1	\$31.00	\$31.00	HOBBYKING
SHIELD XBEE PARA ARDUINO	3	\$6.41	\$19.23	ElectroPro
Resistencia 330 Ohms 0.5W	100	\$0.01	\$1.28	
Bornera 2 pines 12m	15	\$0.26	\$3.85	
Pin Header Hembra 1x40	7	\$0.26	\$1.79	
Espadin Macho Header 1x40	7	\$0.26	\$1.79	
ANCOR, CABLE MARINO DOBLE C/BLANCO 14 AWG/2 x pie	20	S/.4.40	S/.88.00	HARBOR MARINE
COMPONENTES MECÁNICOS				
Perfiles V-SLOT 20-40 L 0.995 m	6	\$24.36	\$146.15	
Bracket de esquina de 90° 20x20x17	5	\$0.85	\$4.23	
Tuerca en T de inserción M5	10	\$0.26	\$2.56	
Tornillos Allen cabeza redonda M5 x 12	20	\$0.06	\$1.28	
Arandela M5 1mm espesor	20	\$0.05	\$1.03	
Perfiles VSLOT 20-40 L 0.35 m	10	\$24.36	\$243.59	
Precio por corte de Vslot	1	\$2.50	\$2.50	
Tornillo Allen cabeza cilíndrica M6x50	50	\$0.40	\$20.00	La Casa del Perno
Sellante Sikaflex-227 Blanco 300 ml	3	\$18.28	\$54.83	SODIMAC
3M, 4200 FAST CURE WHITE 10 OZ. CART. (300 ml)	2	S/.159.90	S/.319.80	HARBOR MARINE
TOTAL(en dólares)			\$2,907.89	
Tasa cambio: S/3.82↔\$ 1			S/11 108.20	

Por parte del USV Principal, se están cotizando diferentes opciones del Generador Hidráulico. Para ello en las siguientes imágenes se aprecia las cotizaciones de ambas opciones, así como las principales características que posee cada una.

SUMINISTRO DE UNIDAD HIDRAULICA GASOLINERO DE 25 HP		1	U.N	11900.00	11900.00
MOTOR:	25 HP				
CAUDAL:	45 L/Min				
PRESIÓN:	170 Bar				
COMPRENDE:					
Motor Kubota diésel refrigerado por líquido de 25 HP Tanque de combustible de 7 galones Válvula de alivio montada en la parte delantera de la bomba de engranajes (preajustada a 150 bar) Contrabalanceado para operación a alta velocidad Bomba de una sola etapa, desplazamiento de 12 GPM Depósito hidráulico de 9 galones Manómetro, 0-3000 PSI, lleno de líquido Válvula de alivio ajustable Filtro de línea de retorno, elemento de 10 micras Minilla/nivel/medidor de temperatura Intercambiador de calor enfriado por ventilador Arranque eléctrico con Batería de 12 voltios y estuche					
Dimensiones generales: 1075x910x887 mm					
FORMA DE PAGO	:	CONTADO	SUB TOTAL	US\$ 11900.00	
TIEMPO DE ENTREGA	:	15 DIAS	IGV	US\$ 2142.00	
VALIDEZ DE LA OFERTA	:	10 DIAS	TOTAL	US\$ 14042.00	
GARANTIA	:	12 MESES			



Figura 2.5.1. Cotización por la empresa Whynco Perú

Fuente: Propia

Opción 2:

Cant.	Descripción	Precio por unidad	Precio total
01	Unidad de potencia hidraulicos con motor petrolero de 1750 rpm con doble bomba de 23lpm y 15lpm.	S/15405.00	S/15405.00
	-estructura de fijacion para la el aseite la bomba - un tablero de de salidas de la bomba con acoples rapidos dec1/2 npt -regulador de presion de 250 bar -Acople y campana de fijacion para la bomba y el motor -filtro de retorno y un monometro dec250 bar -Filtro de succion y tapa de llegado -visor de nivel para aseite y temperatura -tablero de comando		
PRECIOS NO INCLUYEN IGV TODOS LOS PRECIO SON Subtotal			S/15405.00
+IGV18%			S/2772.90
Total			S/18177.90
Nº DE Cuenta bcp corriente :1912499915064			
FORMA DE PAGO: 50%			
FECHA DE ENTREGA: i15 dias			

Figura 2.5.2. Cotización por la empresa “Soluciones neumaticos e hidraulicos e irl”

Fuente: Propia

De la misma manera, se propone el uso de una piscina inflable para las pruebas de los USV en un ambiente marino. En la Tabla 2.5.3, se describen las principales características que posee cada una de ellas.

Tabla 2.5.3. Lista de comparativa de piscinas

Fuente: Propia

Modelo	Piscina estructural rectangular	Set De Piscina Estructural Pow
Imagen		
Largo (cm)	400	956
Ancho (cm)	211	488
Alto (cm)	81	132

Tienda	Sodimac	Sodimac
Precio	S/ 699	S/ 8999

3.0. CAPÍTULO 3: INTEGRACIÓN Y PRUEBAS

- **USV Principal:**

EL USV Principal es el encargado de controlar el Power Pack, el skimmer y el movimiento del mismo USV, además de enviar señales al USV auxiliar. Para ello se requieren diversos sensores y actuadores para la navegación autónoma y un adicional de Controlador Futaba para la navegación teleoperada.

Para controlar el movimiento del USV Principal de manera teleoperada se utilizan los canales 1 y 2 del Controlador Futaba:



Figura 3.1. Control de mando Futaba T6k
Fuente: Propia

Estos respectivamente controlan el movimiento horizontal y vertical con solo mover el joystick. Las señales de salida del Futaba receiver son PWM las cuales son interpretadas por el siguiente código, utilizando la librería “EnableInterrupt” de arduino:

```

#include
<EnableInterrupt.h>
#include <Servo.h>

#define SERIAL_PORT_SPEED 9600
#define RC_NUM_CHANNELS 4

#define RC_CH1 0
#define RC_CH2 1
#define RC_CH3 2
#define RC_CH4 3

#define RC_CH1_INPUT A0
#define RC_CH2_INPUT A1
#define RC_CH3_INPUT A2
#define RC_CH4_INPUT A3

uint16_t
rc_values[RC_NUM_CHANNELS];
uint32_t rc_start[RC_NUM_CHANNELS];
volatile uint16_t rc_shared[RC_NUM_CHANNELS];

void rc_read_values()
{ noInterrupts();
  memcpy(rc_values, (const void *)rc_shared, sizeof(rc_shared));
  interrupts();
}

void calc_input(uint8_t channel, uint8_t input_pin) {
  if (digitalRead(input_pin) == HIGH) {
    rc_start[channel] = micros();
  } else {
    uint16_t rc_compare = (uint16_t)(micros() - rc_start[channel]);
    rc_shared[channel] = rc_compare;
  }
}

void calc_ch1() { calc_input(RC_CH1, RC_CH1_INPUT);
} void calc_ch2() { calc_input(RC_CH2,
RC_CH2_INPUT); } void calc_ch3() { calc_input(RC_CH3, RC_CH3_INPUT); } void calc_ch4()
{ calc_input(RC_CH4, RC_CH4_INPUT); }

void setup() {
  Serial.begin(SERIAL_PORT_SPEED);
//Serial1.begin(9600);
  pinMode(RC_CH1_INPUT,
INPUT);
  pinMode(RC_CH2_INPUT,
INPUT);
  pinMode(RC_CH3_INPUT,
INPUT);
  pinMode(RC_CH4_INPUT,
INPUT);

  enableInterrupt(RC_CH1_INPUT, calc_ch1,
CHANGE); enableInterrupt(RC_CH2_INPUT,
calc_ch2, CHANGE);
  enableInterrupt(RC_CH3_INPUT, calc_ch3,
CHANGE); enableInterrupt(RC_CH4_INPUT,
calc_ch4, CHANGE);
}

void loop() {
  rc_read_values();
}

```

```
rc_values[RC_CH1]=map(rc_values[RC_CH1],1050,1988,1100,1900);
rc_values[RC_CH2]=map(rc_values[RC_CH2],1000,1988,1900,1100);
rc_values[RC_CH3]=map(rc_values[RC_CH3],900,2150,1900,1100);
rc_values[RC_CH4]=map(rc_values[RC_CH4],900,2150,1900,1100);

if( rc_values[RC_CH1]>=1450 && rc_values[RC_CH1]<=1550){ rc_values[RC_CH1]=1500;}
if( rc_values[RC_CH2]>=1450 && rc_values[RC_CH2]<=1550){ rc_values[RC_CH2]=1500;}
```

```

if( rc_values[RC_CH3]>=1400 && rc_values[RC_CH3]<=1600){ rc_values[RC_CH3]=2;}
else if(rc_values[RC_CH3]>=1100 && rc_values[RC_CH3]<=1400){
rc_values[RC_CH3]=1;} else if(rc_values[RC_CH3]>=1600 &&
rc_values[RC_CH3]<=1900){ rc_values[RC_CH3]=3;}

if( rc_values[RC_CH4]>=1400 && rc_values[RC_CH4]<=1600){ rc_values[RC_CH4]=2;}
else if(rc_values[RC_CH4]>=1100 && rc_values[RC_CH4]<=1400){
rc_values[RC_CH4]=1;} else if(rc_values[RC_CH4]>=1600 &&
rc_values[RC_CH4]<=1900){ rc_values[RC_CH4]=3;}

//Serial.print("CH1:");
Serial.print(rc_values[RC_CH1]); Serial.print("/");
//Serial.print("CH2:");
Serial.print(rc_values[RC_CH2]); Serial.print("/");
//Serial.print("CH3:");
Serial.print(rc_values[RC_CH3]); Serial.print("/");
//Serial.print("CH4:");
Serial.println(rc_values[RC_CH
4]);

delay(1000);
}

```

Al procesar las señales, los resultados del valor de cada canal varían:

- Canal 1: 1100 - 1900 (Izquierda - Derecha)
- Canal 2: 1100 - 1900 (Arriba - Abajo)

Estos valores son los encargados de accionar los Thrusters T200 del USV Principal mediante PWM.

Exclusivamente para estas pruebas, las señales del Futaba son procesadas y enviadas al USV Auxiliar mediante XBee para controlar los motores. Para posteriores pruebas, se creará un algoritmo que procese las señales del Futaba y controle las señales enviadas al USV Auxiliar debido a que el movimiento del USV Principal y Auxiliar no es el mismo, sino que deben moverse en conjunto manteniendo una distancia de precaución.

Los resultados fueron los siguientes:

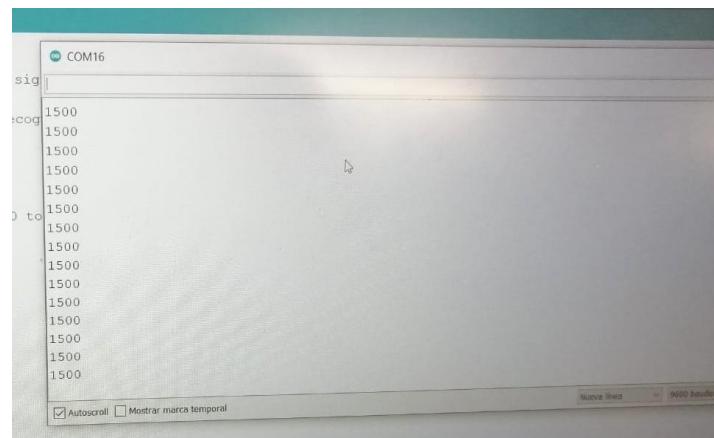


Figura 3.2. Resultados de transmisión de un solo canal del Futaba
Fuente: Propia

Para controlar el Power Pack, se planea utilizar válvulas proporcionales para regular el flujo que activa los motores de los rodillos del Skimmer y la bomba. Estas válvulas proporcionales son controladas mediante variaciones de voltaje. Hasta el presente, aún se sigue cotizando la parte electrónica.

- **USV Auxiliar:**

Los USV auxiliares están encargados de moverse en conjunto con el USV Principal, para ello se reciben las señales de movimiento del USV Principal, además de señales de posición y de orientación.

1) Algoritmo de desplazamiento

Para el movimiento, solo para este avance, se recibió las señales procesadas del Futaba y se controlaron los motores respecto a ello. El algoritmo de direccionamiento Diferencial fue parte importante al controlar los motores y fue logrado gracias a la librería “DifferentialSteering” recopilada del siguiente github, el cuál fue editado para obtener valores apropiados para controlar los T200:

<https://github.com/edumardo/DifferentialSteering.git>

```

I received: 1152/1862
CH1: 1152      CH2: 1862
Differential | Pivot threshold: 32 | Left Motor: 1547 | Right Motor: 1862
I received: 1231/1862
CH1: 1231      CH2: 1862
Differential | Pivot threshold: 32 | Left Motor: 1618 | Right Motor: 1862
I received: 1500/1500
CH1: 1500      CH2: 1500
Differential | Pivot threshold: 32 | Left Motor: 1500 | Right Motor: 1500
I received: 1869/1862
CH1: 1869      CH2: 1862
Differential | Pivot threshold: 32 | Left Motor: 1862 | Right Motor: 1528
I received: 1869/1852
CH1: 1869      CH2: 1852
Differential | Pivot threshold: 32 | Left Motor: 1852 | Right Motor: 1527
I received: 1214/1858

```

Figura 3.3: Resultados óptimos en la simulación

Fuente: Propia

Los valores recibidos del xbee son, por ejemplo: 1869/1862, es decir adelante y derecha. Y gracias al algoritmo, el motor derecho recibe poca potencia y el izquierdo más potencia con el fin de realizar un giro a la derecha avanzando.

Para controlar los Thrusters T200 simplemente basta con utilizar la librería “Servo” de arduino. Al imprimir los valores entre 1100 a 1900 se controla el movimiento de los Thrusters.

- Sentido antihorario: $1100 < x < 1500$
- Estático: $x = 1500$
- Sentido horario: $1500 < x < 1900$

Sentencia a emplear:

`Servo.writeMicroseconds(x);`

2) Comunicación Inalámbrica - XBEE

Para poder tener una comunicación con los XBEE primero se deben configurar algunos parámetros de este en el XCTU.

Principalmente, un módulo debe funcionar como Coordinador y los otros dos como End device. Todos se comunicarán por el mismo canal: C y tendrán el mismo ID: 3332. Para esta prueba no se utiliza el modo API, sino el AT. Y por último, el Destination Address High y Low de un xbee deben ser los Serial Number High y Low del otro para que haya una comunicación solo entre los dos módulos. En este caso, los USV auxiliares deben tener comunicación solo con el USV principal y no entre ellos, por lo tanto será bidireccional entre un USV auxiliar y principal. Para el USV principal, se debe configurar en modo broadcast en donde pueda enviar mensajes a todos los USV auxiliares: Destination Address High = FFFF y Destination Address High = 0.

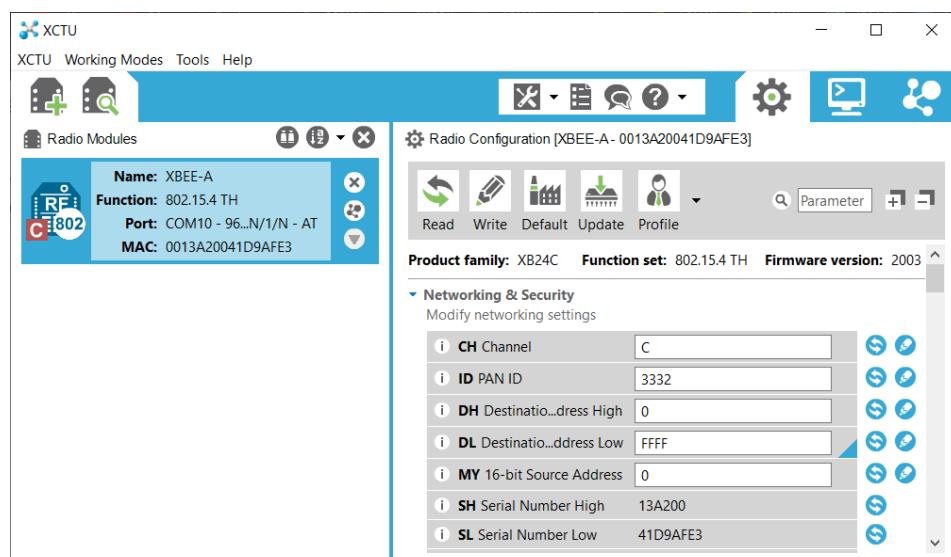
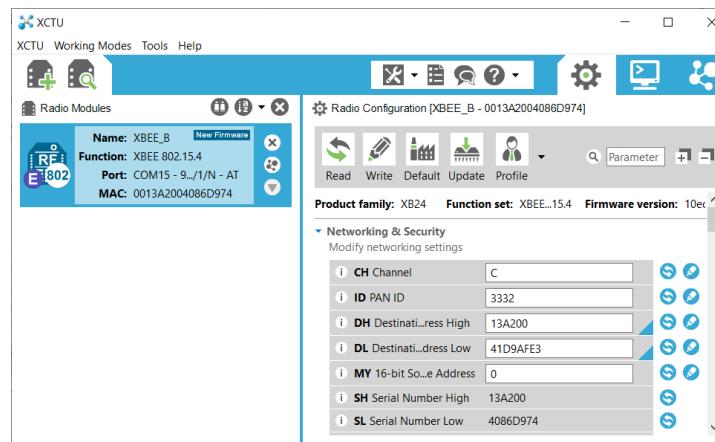
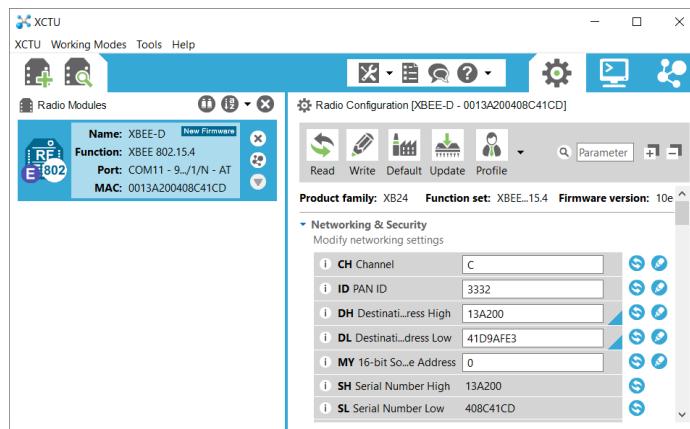


Figura 3.4: Configuración del XBee del USVI principal

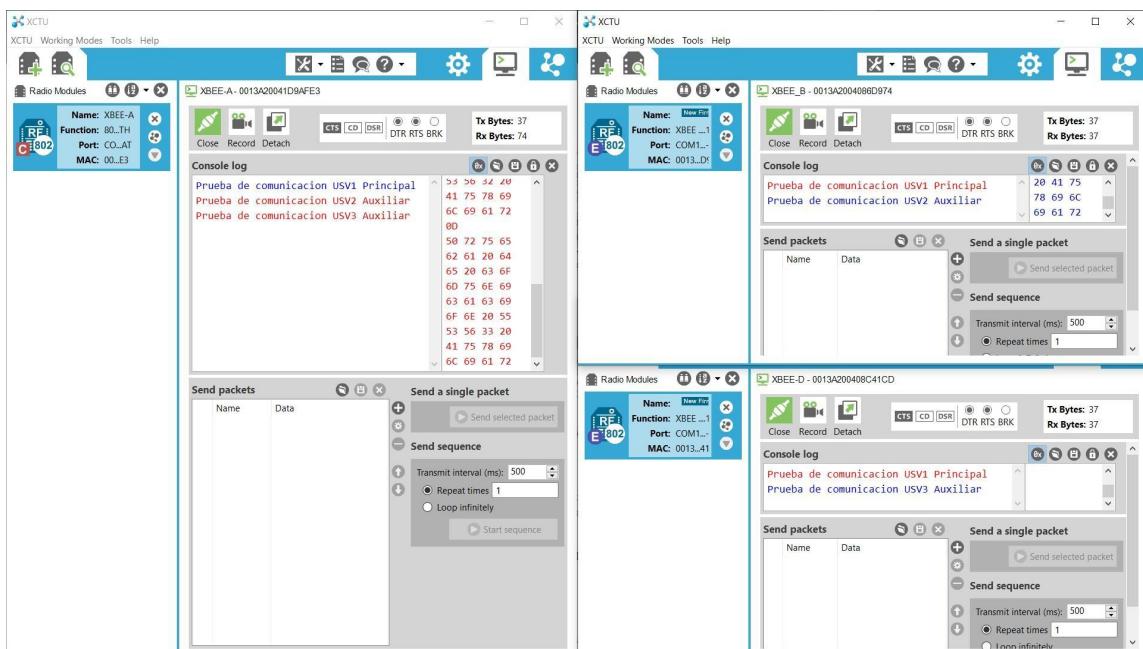
Fuente: Propia



*Figura 3.5: Configuración del XBee del USV2 auxiliar
Fuente: Propia*



*Figura 3.6: Configuración del XBee del USV3 auxiliar
Fuente: Propia*



*Figura 3.7. Resultados de la comunicación entre XBEEs
Fuente: Propia*

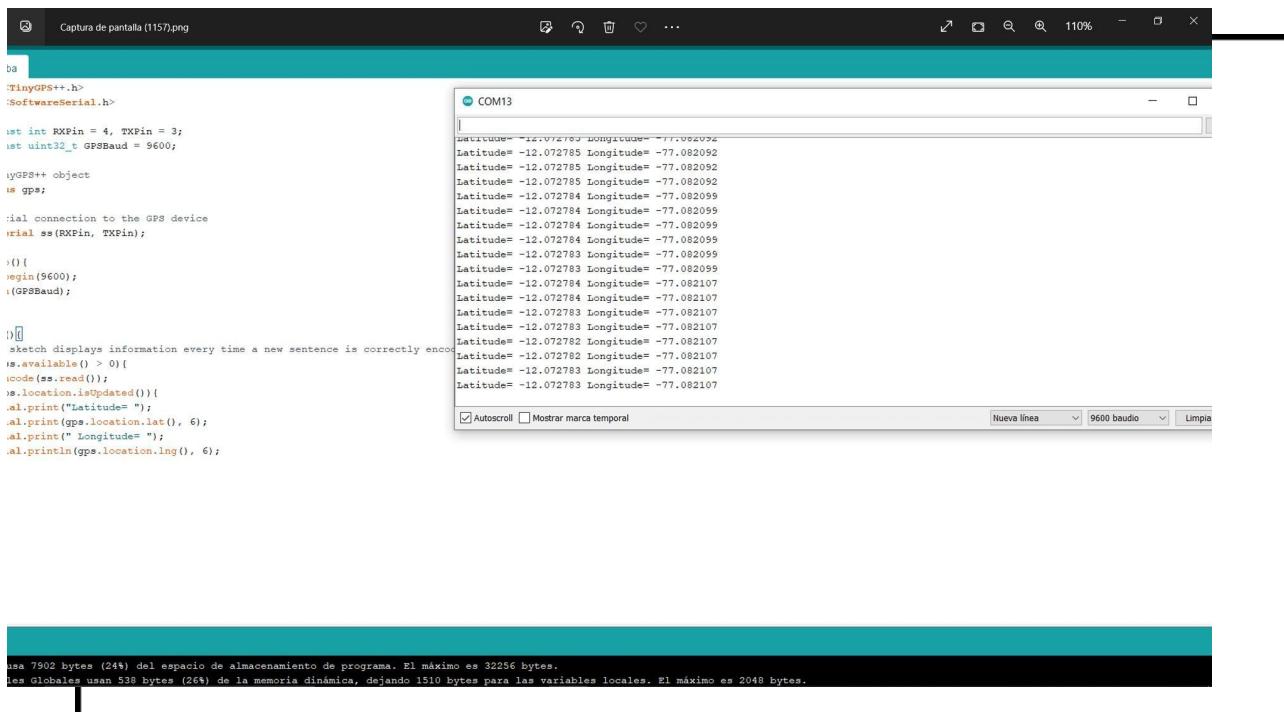
En la figura se evidencia los resultados de la comunicación. Las oraciones en azul son los caracteres que se envían desde ese XBee y los rojos son los que se reciben. Los XBEEs funcionan correctamente ya que el USV principal se comunica con todos los USV auxiliares y viceversa, pero no entre los USVs auxiliares.

3) Arduino - XBEE

Para poder realizar la comunicación entre XBEE mediante señales enviadas del Arduino, basta con conectar un puerto Tx del Arduino al pin Tx del Xbee Adapter o Din del Xbee para las señales a enviar y el puerto Rx del Arduino al pin Rx del Xbee Adapter o Dout del Xbee para las señales a recibir.

4) Sensor GPS

Se comparó el funcionamiento del GPS con el Google Maps en tiempo real para los parámetros de longitud y latitud, con lo que se comprueba el correcto funcionamiento del módulo GPS adquirido.



```

TinyGPS++.h>
SoftwareSerial.h>

int RXPin = 4, TXPin = 3;
uint32_t GPSBaud = 9600;

GPS++ object
gps;

Serial connection to the GPS device
Serial ss(RXPin, TXPin);

() {
  begin(9600);
  (GPSBaud);

D
sketch displays information every time a new sentence is correctly encoded
.available() > 0 {
  code(ss.read());
  location.isUpdated() {
    .al.print("Latitude= ");
    .al.print(gps.location.lat(), 6);
    .al.print(" Longitude= ");
    .al.println(gps.location.lng(), 6);
}

```

Latitude= -12.072785 Longitude= -77.082092
Latitude= -12.072785 Longitude= -77.082092
Latitude= -12.072785 Longitude= -77.082092
Latitude= -12.072784 Longitude= -77.082099
Latitude= -12.072784 Longitude= -77.082099
Latitude= -12.072784 Longitude= -77.082099
Latitude= -12.072783 Longitude= -77.082099
Latitude= -12.072783 Longitude= -77.082099
Latitude= -12.072784 Longitude= -77.082107
Latitude= -12.072784 Longitude= -77.082107
Latitude= -12.072783 Longitude= -77.082107
Latitude= -12.072783 Longitude= -77.082107
Latitude= -12.072782 Longitude= -77.082107
Latitude= -12.072782 Longitude= -77.082107
Latitude= -12.072783 Longitude= -77.082107
Latitude= -12.072783 Longitude= -77.082107

Nueva línea 9600 baudio Limpiar

usa 7902 bytes (24%) del espacio de almacenamiento de programa. El máximo es 32256 bytes.
variables globales usan 538 bytes (26%) de la memoria dinámica, dejando 1510 bytes para las variables locales. El máximo es 2048 bytes.

Figura 3.8: Obtención de parámetros Latitud y Longitud por módulo GPS Fuente: Propia

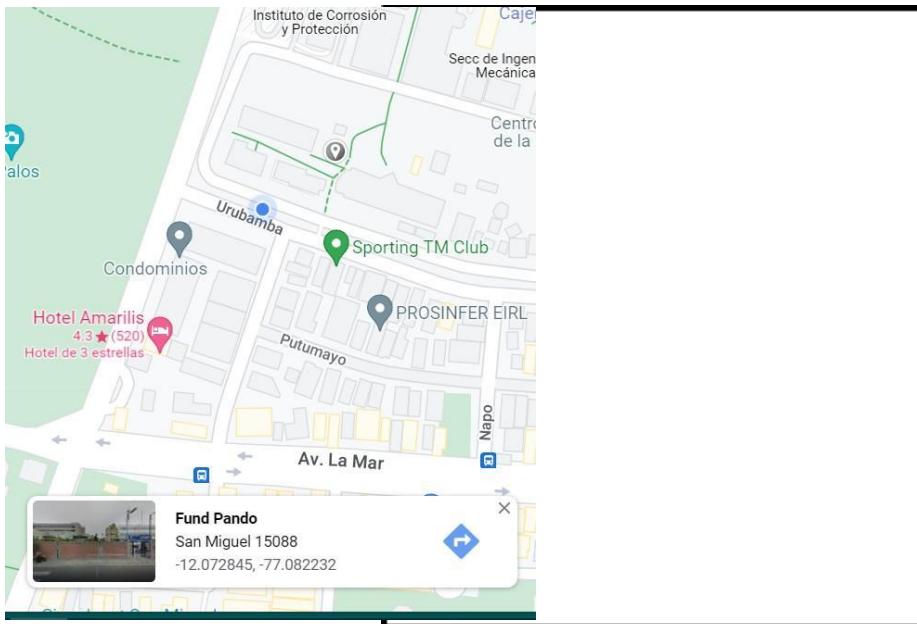


Figura 3.9. Parámetros de Latitud y Longitud según Google Maps
Fuente: Propia

El principal objetivo del GPS en el proyecto es monitorear la distancia entre USVs.

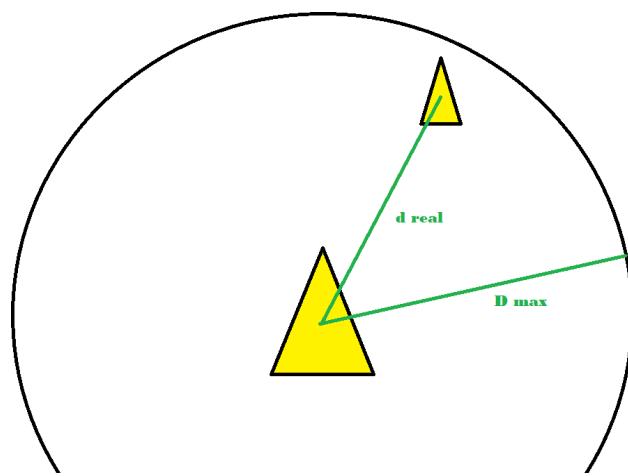


Figura 3.10. Rango permisible del USV auxiliar con respecto al USV principal
Fuente: Propia

El USV auxiliar no debe alejarse del USV principal sobre pasando el D_{max} debido a que causaría una tensión excesiva en las uniones de las barreras. Además este valor de distancia será utilizado en el control de formación del sistema total.

5) Sensor MPU 92/65

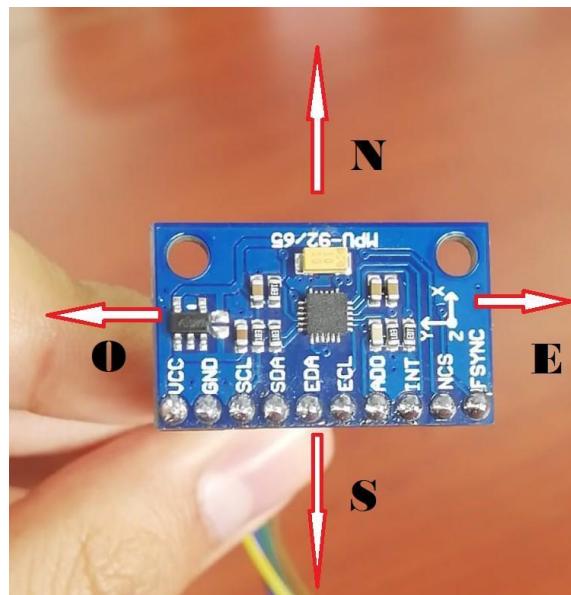


Figura 3.11. Ejes cardinales en el MPU
Fuente: Propia

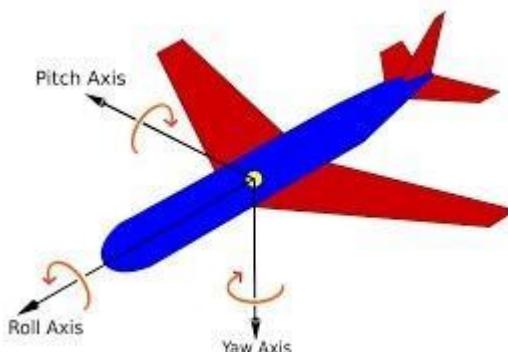


Figura 3.12. Ilustración de ejes representados en el MPU
Fuente: Propia

```
Raw, Pitch, Roll: 145.07, 0.63, 125.09
Yaw, Pitch, Roll: 145.08, 0.63, 125.08
Yaw, Pitch, Roll: 145.93, 0.62, 125.11
Yaw, Pitch, Roll: 145.93, 0.61, 125.11
Yaw, Pitch, Roll: 145.90, 0.60, 125.10
Yaw, Pitch, Roll: 145.95, 0.61, 125.11
Yaw, Pitch, Roll: 145.96, 0.60, 125.11
Yaw, Pitch, Roll: 145.96, 0.59, 125.12
Yaw, Pitch, Roll: 145.95, 0.58, 125.10
Yaw, Pitch, Roll: 145.95, 0.58, 125.10
Yaw, Pitch, Roll: 145.98, 0.58, 125.11
Yaw, Pitch, Roll: 146.01, 0.56, 125.13
Yaw, Pitch, Roll: 146.07, 0.56, 125.15
Yaw, Pitch, Roll: 146.06, 0.56, 125.13
Yaw, Pitch, Roll: 146.06, 0.54, 125.12
Yaw, Pitch, Roll: 146.10, 0.54, 125.14
Yaw, Pitch, Roll: 146.12, 0.58, 125.16
Yaw, Pitch, Roll: 146.08, 0.57, 125.14
```

Figura 3.13. Resultados de la simulación del MPU
Fuente: Propia

Los resultados fueron los esperados para el Yaw, Pitch y Roll. Por lo tanto, el sensor ya está listo para ser implementado en el sistema.

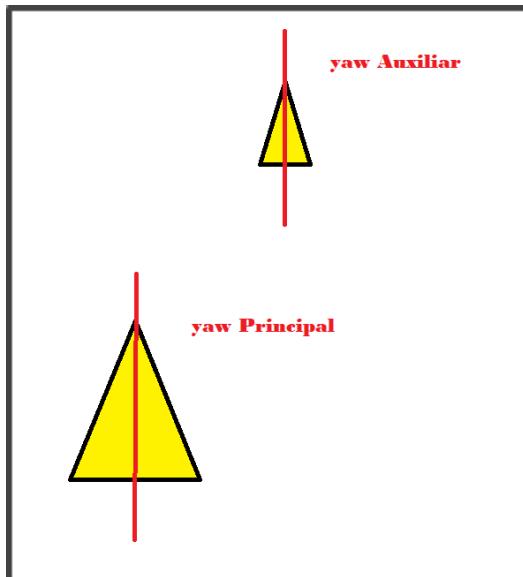


Figura 3.14: Direccionamiento del USV principal y auxiliar
Fuente: Propia

Para evitar errores de alejamiento indebido, el yaw de cada USV será monitoreado y utilizado en el control de formación de todo el sistema.

3.1. Informe de pruebas inmediatas y finales

Prueba del control del thruster T200:

Con la programación ya realizada anteriormente y con la implementación de las conexiones tanto para el Futaba, Xbee, Arduino, ESC y Thruster T200, se procedió a suministrar energía de 12V para la operatividad del propulsor. Ello se realizó con la supervisión del Jefe de Práctica, Miguel Vargas, y se obtuvo una operación exitosa. Por tanto, hasta el momento, se ha logrado controlar el Thruster T200 por medio de una señal proveniente del Futaba f6k.



Figura 3.1.1. Puesta en marcha del motor

Fuente: Propia

Prueba de la PCB realizada para el control del USV auxiliar:

Se realizó la integración del GPS, MPU, capacitores, resistencias, botón, borneras, switches, arduino y XBee en la PCB diseñada para el control de un USV Auxiliar.

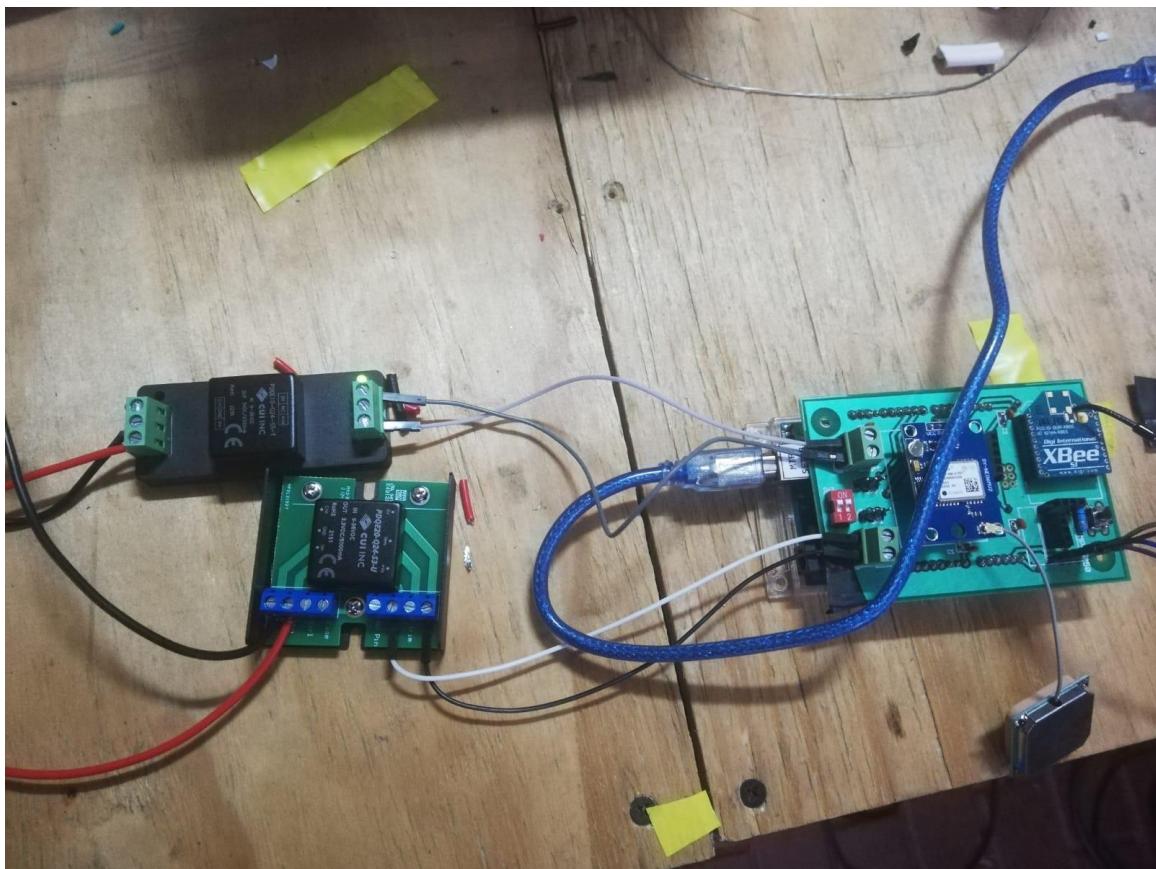


Figura 3.1.2. PCB energizada por reguladores

Fuente: Propia

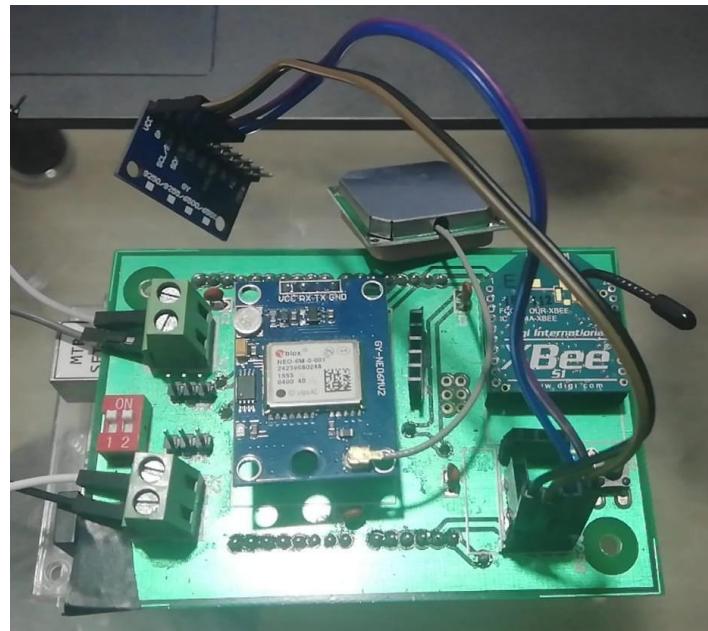


Figura 3.1.3. Vista superior de la PCB con sus componentes
Fuente: Propia

Como resultado se obtuvo una PCB en óptimas condiciones habiendo continuidad en los pines requeridos de comunicación y control, y energizando todos los componentes correctamente. Las simulaciones de los datos recibidos y enviados se encuentran en el informe de resultados.

Prueba del montaje de placas de aluminio al USV auxiliar:

Para unir el skimmer a las barreras y a los cascos se hace uso de U Bolts y cadenas de acero inoxidable. Se opta por esta unión no rígida debido al movimiento brusco de los cascos y el skimmer debido a la marea.



*Figura 3.1.4. Remache de tuerca en placa de aluminio
Fuente: Propia*



Figura 3.1.5. Placas de aluminio remachadas y unión de VSlot a casco auxiliar Fuente: Propia



*Figura 3.1.6. Placa colocada y ensamble total de USV Auxiliar
Fuente: Propia*

3.2. Informe de resultados de simulaciones realizadas

SISTEMA DE CONTROL

- **Algoritmo de direccionamiento diferencial:**

La presente función fue adaptada para funcionar correctamente con los valores requeridos.

```

void DifferentialSteering::computeMotors(int XValue, int YValue) {
    float nMotPremixL = 0; // Motor (left) premixed output
    float nMotPremixR = 0; // Motor (right) premixed output
    int nPivSpeed = 0; // Pivot Speed
    float fPivScale = 0; // Balance scale b/w drive and
    pivot
    XValue=XValue-1500;
    YValue=YValue-1500;

    // Calculate Drive Turn output due to Joystick X input
    if (YValue >= 0) {
        // Forward
        nMotPremixL = (XValue >= 0) ? COMPUTERANGE : (COMPUTERANGE + XValue);
        nMotPremixR = (XValue >= 0) ? (COMPUTERANGE - XValue) : COMPUTERANGE;
    } else {
        // Reverse
        nMotPremixL = (XValue >= 0) ? (COMPUTERANGE - XValue) : COMPUTERANGE;
        nMotPremixR = (XValue >= 0) ? COMPUTERANGE : (COMPUTERANGE + XValue);
    }

    // Scale Drive output due to Joystick Y input (throttle)
    nMotPremixL = nMotPremixL * YValue / COMPUTERANGE;
    nMotPremixR = nMotPremixR * YValue / COMPUTERANGE;

    // Now calculate pivot amount
    // - Strength of pivot (nPivSpeed) based on Joystick X input
}

```

```

// - Blending of pivot vs drive (fPivScale) based on Joystick Y
input nPivSpeed = XValue;
fPivScale = (abs(YValue) > m_fPivYLimit) ? 0.0 : (1.0 - abs(YValue) / m_fPivYLimit);

// Calculate final mix of Drive and Pivot
m_leftMotor = (1.0 - fPivScale) * nMotPremixL + fPivScale * (nPivSpeed) + 1500;
m_rightMotor = (1.0 - fPivScale) * nMotPremixR + fPivScale * (-nPivSpeed) + 1500;
}

```

Los resultados de la simulación fueron los siguientes:

```

I received: 1869/1852
CH1: 1869      CH2: 1852
Differential | Pivot threshold: 32 | Left Motor: 1852 | Right Motor: 1527
I received: 1214/1858
CH1: 1214      CH2: 1858
Differential | Pivot threshold: 32 | Left Motor: 1602 | Right Motor: 1858
I received: 1166/1862
CH1: 1166      CH2: 1862
Differential | Pivot threshold: 32 | Left Motor: 1559 | Right Motor: 1862
I received: 1135/1862
CH1: 1135      CH2: 1862
Differential | Pivot threshold: 32 | Left Motor: 1531 | Right Motor: 1862
I received: 1135/1862
CH1: 1135      CH2: 1862
Differential | Pivot threshold: 32 | Left Motor: 1531 | Right Motor: 1862
I received: 1152/1858
 Autoscroll  Mostrar marca temporal

```

*Figura 3.2.1. Resultados 1 del algoritmo de direccionamiento
Fuente: Propia*

```

I received: 1152/1862
CH1: 1152      CH2: 1862
Differential | Pivot threshold: 32 | Left Motor: 1547 | Right Motor: 1862
I received: 1231/1862
CH1: 1231      CH2: 1862
Differential | Pivot threshold: 32 | Left Motor: 1618 | Right Motor: 1862
I received: 1500/1500
CH1: 1500      CH2: 1500
Differential | Pivot threshold: 32 | Left Motor: 1500 | Right Motor: 1500
I received: 1869/1862
CH1: 1869      CH2: 1862
Differential | Pivot threshold: 32 | Left Motor: 1862 | Right Motor: 1528
I received: 1869/1852
CH1: 1869      CH2: 1852
Differential | Pivot threshold: 32 | Left Motor: 1852 | Right Motor: 1527
I received: 1214/1858
 Autoscroll  Mostrar marca temporal

```

*Figura 3.2.2. Resultados 2 del algoritmo de direccionamiento
Fuente: Propia*

*Figura 3.2.3. Resultados 3 del algoritmo de direccionamiento
Fuente: Propia*

De las figuras mostradas anteriormente se puede observar que los valores recibidos del XBee son procesados por el algoritmo de diferencial y generan como resultado el control de cada motor.

Ejemplo: “1231/1862” (Izquierda/Adelante)

Para este caso, el motor izquierdo recibe 1618 y el derecho 1862, eso quiere decir que, el motor izquierdo recibió poca corriente y el derecho más, resultando en un giro a la izquierda avanzando.

- Simulación del GPS

```
COM13
Latitude= -12.072783 Longitude= -77.082092
Latitude= -12.072785 Longitude= -77.082092
Latitude= -12.072785 Longitude= -77.082092
Latitude= -12.072785 Longitude= -77.082092
Latitude= -12.072785 Longitude= -77.082092
Latitude= -12.072784 Longitude= -77.082099
Latitude= -12.072784 Longitude= -77.082099
Latitude= -12.072784 Longitude= -77.082099
Latitude= -12.072784 Longitude= -77.082099
Latitude= -12.072783 Longitude= -77.082099
Latitude= -12.072783 Longitude= -77.082099
Latitude= -12.072784 Longitude= -77.082107
Latitude= -12.072784 Longitude= -77.082107
Latitude= -12.072783 Longitude= -77.082107
Latitude= -12.072783 Longitude= -77.082107
Latitude= -12.072782 Longitude= -77.082107
Latitude= -12.072782 Longitude= -77.082107
Latitude= -12.072783 Longitude= -77.082107
Latitude= -12.072783 Longitude= -77.082107
```

Figura 3.2.4. Resultados de la simulación del GPS Fuente: Propia

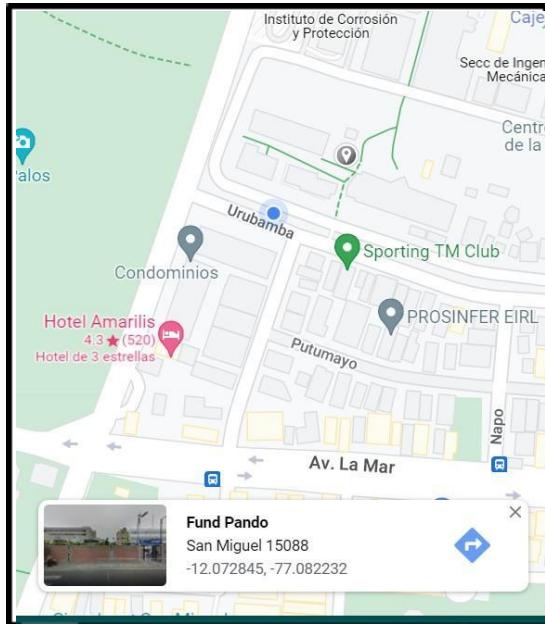


Figura 3.2.5. Ubicación en tiempo real usando Google Maps

Fuente: Google Maps

Como se aprecia en las imágenes, los valores de latitud y longitud obtenidos son similares. Esto concluye que la calibración del GPS es correcta y las posteriores simulaciones para el control de la distancia entre el USV Principal y los USV Auxiliares no presentan errores significativos, y se deberá estar calibrando periódicamente para evitar que el error aumente.

- Simulación del MPU

```
COM13
[ ] Enviar
raw, Pitch, Roll: 145.87, 8.63, 125.09
Yaw, Pitch, Roll: 145.88, 8.63, 125.08
Yaw, Pitch, Roll: 145.93, 8.62, 125.11
Yaw, Pitch, Roll: 145.93, 8.61, 125.11
Yaw, Pitch, Roll: 145.90, 8.60, 125.10
Yaw, Pitch, Roll: 145.95, 8.61, 125.11
Yaw, Pitch, Roll: 145.96, 8.60, 125.11
Yaw, Pitch, Roll: 145.96, 8.59, 125.12
Yaw, Pitch, Roll: 145.95, 8.58, 125.10
Yaw, Pitch, Roll: 145.95, 8.58, 125.10
Yaw, Pitch, Roll: 145.98, 8.58, 125.11
Yaw, Pitch, Roll: 146.01, 8.56, 125.13
Yaw, Pitch, Roll: 146.07, 8.56, 125.15
Yaw, Pitch, Roll: 146.06, 8.56, 125.13
Yaw, Pitch, Roll: 146.06, 8.54, 125.12
Yaw, Pitch, Roll: 146.10, 8.54, 125.14
Yaw, Pitch, Roll: 146.12, 8.58, 125.16
Yaw, Pitch, Roll: 146.08, 8.57, 125.14

 Autoscroll  Mostrar marca temporal Nueva línea 115200 baudio Limpiar salida
```

Figura 3.2.6. Resultados de la simulación del MPU

Fuente: Propia

Los datos presentados en esta simulación brindan información sobre los ángulos de desfase respecto a los ejes cardinales. Al girar el MPU en diferentes ejes, se logró apreciar la variación de este, además de permitirnos identificar los ejes cardinales referenciales. Gracias a esta simulación se concluye que el MPU brinda datos certeros y podrá ser utilizado para el control de movimiento junto con el GPS.

- Simulación del USV auxiliar

Se utilizó el siguiente código para probar la funcionalidad del USV auxiliar al momento de recibir y enviar datos mientras el arduino está montado en la PCB y siendo energizado por una fuente de 12V con reguladores.

```
//Control del USV AUXILIAR

//Incluimos las librerías necesarias
#include <Servo.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <MPU9250_asukiaaa.h>

#include <Adafruit_BMP280.h>
#include <TinyGPS.h>
#include "DifferentialSteering.h"

//Definimos variables y pines
byte servoPin1 = 9;
byte servoPin2 = 10;
Servo motor1; //motor Izquierdo
Servo motor2; //motor Derecho

int fPivYLimit = 32; //Pivote
DifferentialSteering DiffSteer;

TinyGPS gps;
SoftwareSerial ss(2, 3); //tx rx

#ifndef _ESP32_HAL_I2C_H_
#define SDA_PIN 21
#define SCL_PIN 22
#endif

MPU9250_asukiaaa mySensor;
float aX, aY, aZ, aSqrt, gX, gY, gZ, mDirection, mX, mY, mZ;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  motor1.attach(servoPin1);
  motor1.writeMicroseconds(1500);
  motor2.attach(servoPin2);
  motor2.writeMicroseconds(1500);
  delay(1000); // el retardo permite al ESC reconocer la señal de 1500
  DiffSteer.begin(fPivYLimit);
```

```

ss.begin(9600);

while(!Serial);
Serial.println("started");

#ifndef _ESP32_HAL_I2C_H_ // For ESP32
Wire.begin(SDA_PIN, SCL_PIN);
mySensor.setWire(&Wire);
#endif

mySensor.beginAccel();
mySensor.beginGyro();
mySensor.beginMag();

}

void loop() {
  while (Serial.available() == 0); //Espera a recibir información en el puerto serial

  String serie = Serial.readStringUntil('\n'); //Leer hasta que haya un cambio de linea Serial.print("I
received: ");
  Serial.println(serie);
  int canal1 = getValue(serie,'0').toInt(); //recibido del canal1 - Direccion vertical int
  canal2 = getValue(serie,'1').toInt(); //recibido del canal2 - Direccion horizontal
  Serial.print("CH1: ");Serial.print(canal1);Serial.print('\t');
  Serial.print("CH2: ");Serial.println(canal2);
  /int canal3 = getValue(serie,'3').toInt(); //recibido del canal3
  /int canal4 = getValue(serie,'4').toInt(); //recibido del canal4

  //Diferencial
  //Definimos parametros
  int XValue = canal1; int
  YValue = canal2; int
  lowLimit = 1100; int
  highLimit = 1900;

  if (((XValue > lowLimit) && (XValue < highLimit) && (YValue > lowLimit) && (YValue < highLimit)))
  {
    DiffSteer.computeMotors(XValue, YValue);

    //Al emplear el algoritmo de diferencial se obtiene el valor para cada motor int
    leftMotor = DiffSteer.computedLeftMotor();
    int rightMotor = DiffSteer.computedRightMotor();

    Serial.println("Differential | " + DiffSteer.toString());
    motor1.writeMicroseconds(leftMotor);
    motor2.writeMicroseconds(rightMotor);
  } else
  {
    Serial.println("valores incorrectos");
  }
  //delay(200);

  uint8_t sensorId;
  int result;

  result = mySensor.readId(&sensorId);
  if(result == 0) {
    Serial.println("sensorId: " + String(sensorId));
  } else {
    Serial.println("Cannot read sensorId " + String(result));
  }

  result = mySensor.accelUpdate();
  if(result == 0) {
    aX = mySensor.accelX();
  }
}

```

```

aY = mySensor.accelY();
aZ = mySensor.accelZ();
aSqrt = mySensor.accelSqrt();
Serial.println("accelX: " + String(aX));
Serial.println("accelY: " + String(aY));
//Serial.println("accelZ: " + String(aZ));
Serial.println("accelSqrt: " + String(aSqrt));
} else {
Serial.println("Cannod read accel values " + String(result));
}

result = mySensor.gyroUpdate();
if (result == 0) {
gX = mySensor.gyroX0;
gY = mySensor.gyroY0;
gZ = mySensor.gyroZ0;
Serial.println("gyroX: " + String(gX));
Serial.println("gyroY: " + String(gY));
Serial.println("gyroZ: " + String(gZ));
} else {
Serial.println("Cannot read gyro values " + String(result));
}

result = mySensor.magUpdate();
if (result == 0) {
mX = mySensor.magX0;
mY = mySensor.magY0;
mZ = mySensor.magZ0;
mDirection = mySensor.magHorizDirection();
Serial.println("magX: " + String(mX)); Serial.println("maxY: "
+ String(mY)); Serial.println("magZ: " + String(mZ));
Serial.println("horizontal direction: " + String(mDirection));
} else {
Serial.println("Cannot read mag values " + String(result));
}

Serial.println("at " + String(millis()) + "ms");
Serial.println(""); // Add an empty line

bool newData = false;
unsigned long chars;
unsigned short sentences, failed;

// For one second we parse GPS data and report some key values for
(unsigned long start = millis(); millis() - start < 1000;
{
while (ss.available())
{
char c = ss.read();
// Serial.write(c); // uncomment this line if you want to see the GPS data flowing if
(gps.encode(c)) // Did a new valid sentence come in?
newData = true;
}
}

if (newData)
{
float flat, flon;
unsigned long age;
gps.f_get_position(&flat, &flon, &age);
Serial.print("LAT=");
Serial.print(flat == TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE ? 0.0 : flat, 6);
Serial.print(" LON=");

```

```

Serial.print(flon == TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE ? 0.0 : flon,
6); Serial.print(" SAT=");
Serial.print(gps.satellites() == TinyGPS::GPS_INVALID_SATELLITES ? 0 :
gps.satellites()); Serial.print(" PREC=");
Serial.print(gps.hdop() == TinyGPS::GPS_INVALID_HDOP ? 0 : gps.hdop());
}

gps.stats(&chars, &sentences,
&failed); Serial.print(" CHARS=");
Serial.print(chars);
Serial.print(" SENTENCES=");
Serial.print(sentences);
Serial.print(" CSUM
ERR=");
Serial.println(failed);
if (chars == 0)
  Serial.println("## No characters received from GPS: check wiring
##"); delay(200);

}

//Funcion que separa cadenas de texto debido a un
separador String getValue(String data, char separator, int
index)
{
  int found = 0;
  int strIndex[] = {0, -1};
  int maxIndex = data.length()-1;

  for(int i=0; i<=maxIndex && found<=index;
  i++){ if(data.charAt(i)==separator ||
  i==maxIndex){
    found++;
    strIndex[0] = strIndex[1]+1;
    strIndex[1] = (i == maxIndex) ?
    i+1 : i;
  }
}
  return found>index ? data.substring(strIndex[0], strIndex[1]) : "";
}

```

Los resultados fueron los siguientes:

```
magX: 39.84
maxY: 1.17
magZ: -62.09
horizontal direction: 88.32
at 250588ms

LAT=-12.072507 LON=-77.082908 SAT=3 PREC=204 CHARS=53306 SENTENCES=111 CSUM ERR=30
I received: 1500/1500/2476/2476
CH1: 1500      CH2: 1500
Differential | Pivot threshold: 32 | Left Motor: 1500 | Right Motor: 1500
sensorId: 115
accelX: 0.41
accely: -0.48
accelSqrt: 0.87
gyroX: -0.37
gyroY: 0.06
gyroZ: 1.28
magX: 41.02
maxY: 0.00
magZ: -63.22
horizontal direction: 90.00
at 252095ms
```

Autoscroll Mostrar marca temporal Nueva linea 9600 baudio Limpiar salida

Figura 3.2.7. Resultados 1 de la simulación del USV
auxiliar Fuente: Propia

```
magX: 39.84
maxY: 0.00
magZ: -63.22
horizontal direction: 90.00
at 253585ms

LAT=-12.072490 LON=-77.082908 SAT=3 PREC=204 CHARS=54197 SENTENCES=115 CSUM ERR=31
I received: 1500/1500/21500/1500/2476/2476
CH1: 1500      CH2: 1500
Differential | Pivot threshold: 32 | Left Motor: 1500 | Right Motor: 1500
sensorId: 115
accelX: 0.41
accely: -0.49
accelSqrt: 0.88
gyroX: -0.49
gyroY: 0.00
gyroZ: 1.28
magX: 41.02
maxY: -1.17
magZ: -65.48
horizontal direction: 91.64
at 255109ms
```

Autoscroll Mostrar marca temporal Nueva linea 9600 baudio Limpiar salida

Figura 3.2.8. Resultados 2 de la simulación del USV
auxiliar Fuente: Propia

Como se observa en los resultados, el módulo GPS, MPU e Xbee están funcionando en simultáneo. El GPS está operando correctamente ya que se imprime la latitud y longitud de su posición actual. El MPU da los datos de aceleración, giro, magnetómetro y dirección horizontal correctamente. Y el XBEE del USV auxiliar recibe los datos de control de los T200 desde el XBEE del USV principal, sin embargo, como se observa en “Resultados 2”, la información recibida es errónea debido a que hay más de 4 números separados por la barra “/”, por lo tanto el procesamiento de esos datos a través del algoritmo de direccionamiento diferencial va a dar números incorrectos. Se requiere de una calibración en el envío de datos del XBEE.

- Simulación del control de seguimiento de trayectoria

A partir de las ecuaciones planteadas para el seguimiento de trayectoria, se obtiene la siguiente simulación en Matlab.

Los parámetros a utilizar son los siguientes:

$m_{11} = 200 \text{ kg}$	$m_{22} = 250 \text{ kg}$	$I_{zz} = 700 \text{ kg.m}^2$
$d_{11} = 70 \text{ kg/s}$	$d_{22} = 100 \text{ kg/s}$	$d_{66} = 50 \text{ kg.m}^2/\text{s}$

Los parámetros del Controlador de seguimiento de trayectoria son los siguientes:

$$\lambda_1 = 3$$

$$\lambda_2 = 3$$

La Trayectoria 1 deseada es de forma sinusoidal (Matlab):

```
xad = t;
yad = 5*sin(0.1*t);
xadp= diff([0 xad]);
yadp= diff([0 yad]);
xadpp = diff([0 xadp]);
yadpp = diff([0 yadp]);
p1=[0 0 pi/2];
```

Valores iniciales:

```
% USV 1
x1(1)=p1(1);
y1(1)=p1(2);
ps1(1)=p1(3);
u1(1)=1;
```

```
v1(1)=0;
r1(1)=0;
```

Teniendo la trayectoria y los parámetros requeridos se plotea los resultados en Matlab.

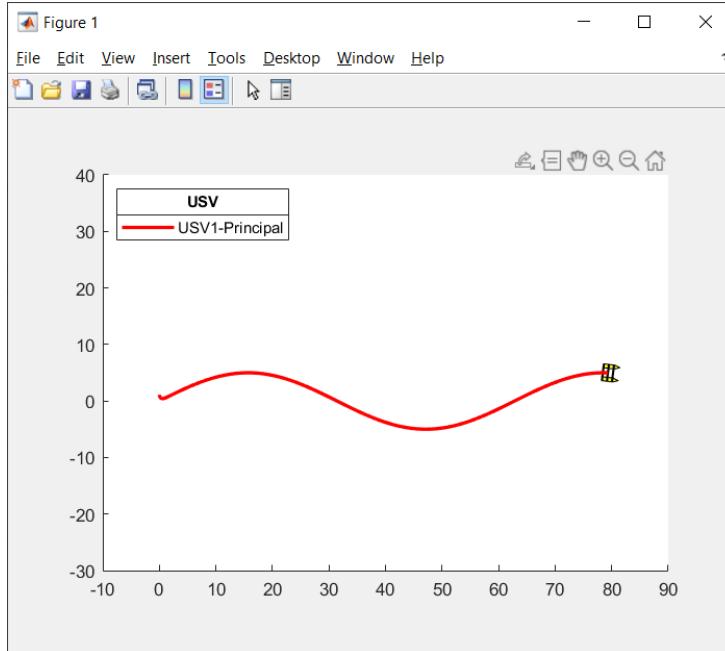


Figura 3.2.9. Resultados de la simulación del control de seguimiento de trayectoria
Fuente: Propia

Como se observa en la gráfica, el punto inicial no forma parte de la trayectoria. Es por ello que el USV trata de rectificar su posición para ser parte de la trayectoria deseada

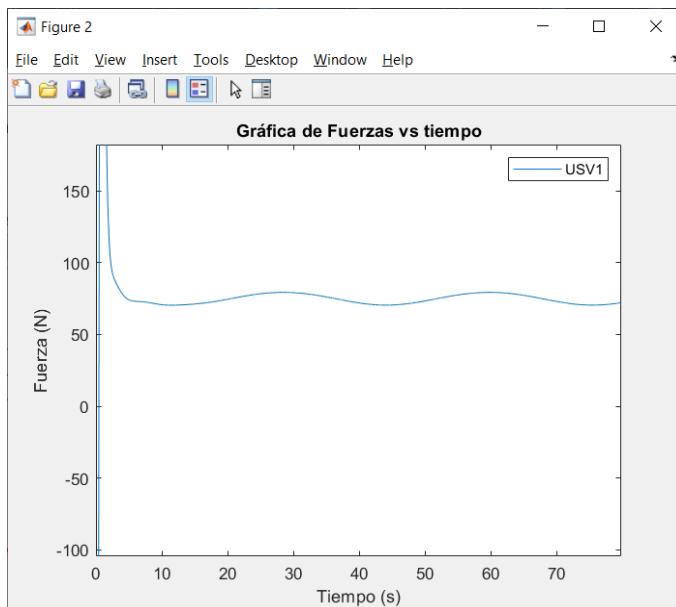


Figura 3.2.10. Gráfica de Fuerzas vs Tiempo
Fuente: Propia

En la presente gráfica, se observa que la fuerza oscila entre 60 y 80 N. Esto es debido a la forma sinusoidal de la trayectoria. El pico del comienzo es para posicionar el USV en la trayectoria e iniciar el movimiento.

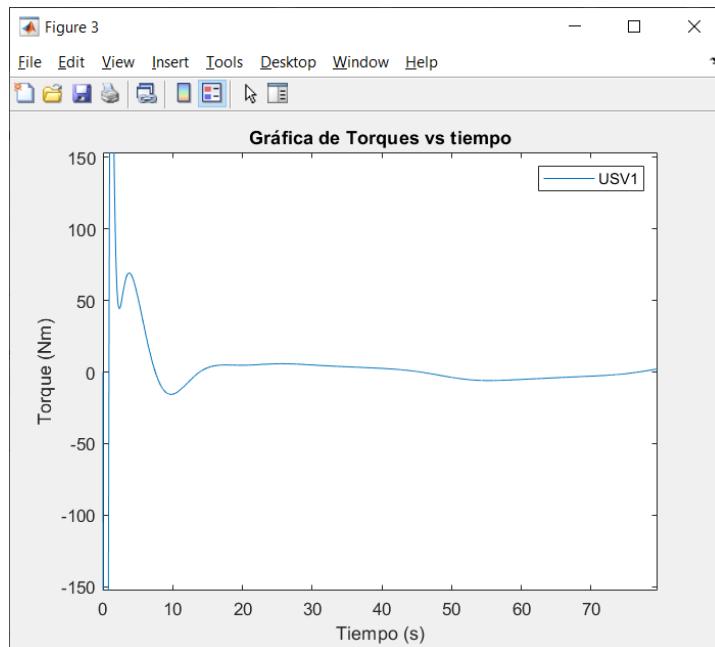


Figura 3.2.11. Resultados de la simulación del control de seguimiento de trayectoria
Fuente: Propia

Los valores de Torque variantes son debido a los giros que tiene que hacer el USV para poder posicionarse en la trayectoria sinusoidal. Como se observa, también se adquieren valores negativos de torque, entonces el sentido de giro resultante es antihorario para ese punto, y valores positivos para giros horarios.

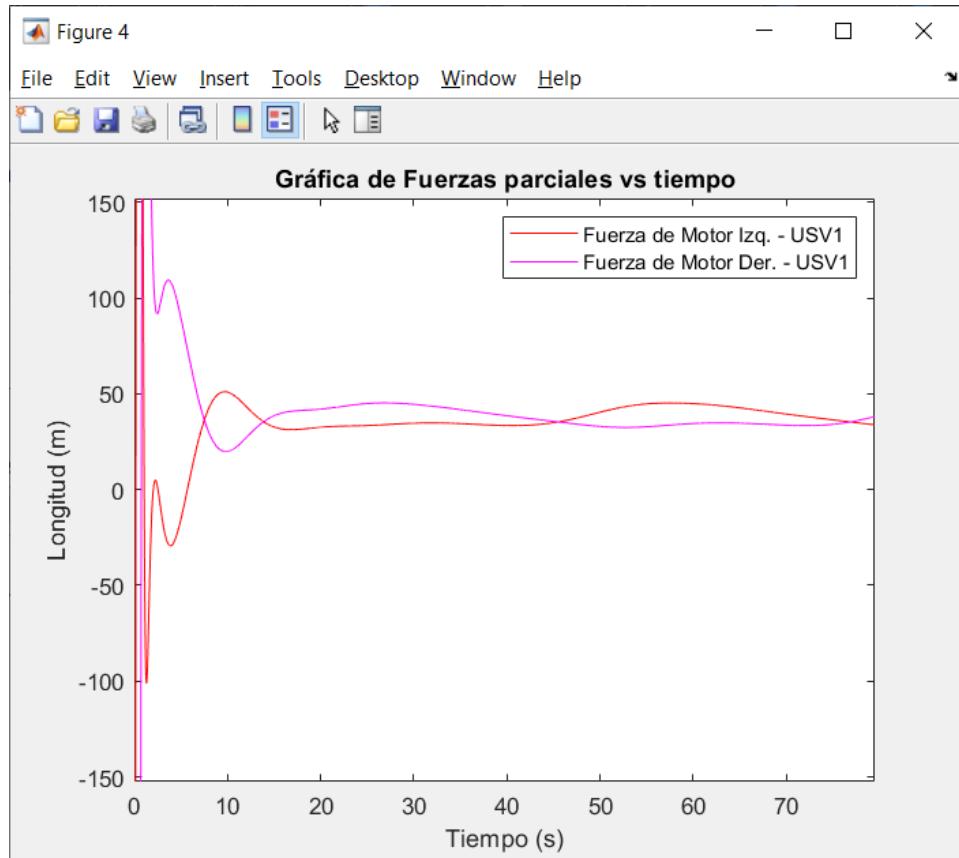


Figura 3.2.12. Gráfica de Fuerzas parciales vs Tiempo

Fuente: Propia

Las fuerzas de cada motor también presentan valores oscilantes debido a los giros que presenta el USV en la trayectoria sinusoidal. En los puntos donde se mantiene el mismo valor de fuerza en ambos motores, la trayectoria es recta.

- Simulación del control de formación del Sistema Total

A partir de las ecuaciones planteadas para el control de formación triangular, se obtiene la siguiente simulación en Matlab con el fin de representar como es su accionar ante diferentes posiciones iniciales.

Los parámetros dinámicos a utilizar son los siguientes:

$m = 300 \text{ kg}$ $m_{11} = 200 \text{ kg}$ $d_{11} = 70 \text{ kg/s}$ $d_{55} = 500 \text{ kg.m2/s}$ $G F^- = 0.5 \text{ m}$	$I_{xx} = 300 \text{ kg.m2}$ $m_{22} = 250 \text{ kg}$ $d_{22} = 100 \text{ kg/s}$ $d_{66} = 50 \text{ kg.m2/s}$ $\rho = 1000 \text{ kg/m3}$	$I_{yy} = 700 \text{ kg.m2}$ $m_{33} = 300 \text{ kg}$ $d_{33} = 100 \text{ kg/s}$ $MT^- p = 0.5 \text{ m}$ $g = 9.81 \text{ m/s2}$	$I_{zz} = 700 \text{ kg.m2}$ $m_{66} = 80 \text{ kg.m2}$ $d_{44} = 500 \text{ kg.m2/s}$ $MT^- q = 0.5 \text{ m}$ $Awp = 1 \text{ m2}$
---	--	---	---

Los parámetros del Controlador $l - \alpha$ del USV1 y USV2 son los siguientes:

ld12 = 9 m	$\alpha d12 = 30^\circ$	$a1 = 1000$	$a2 = 1000$
$n = 0.05$	$d = 2.0$	$\lambda 1 = 5$	$\lambda 2 = 8$

Los parámetros del Controlador $1 - \alpha$ del USV1 y USV3 son los siguientes:

ld12 = 9 m	$\alpha d12 = -30^\circ$	$a1 = 1000$	$a2 = 1000$
$n = 0.05$	$d = 2.0$	$\lambda 1 = 5$	$\lambda 2 = 8$

Valores iniciales en Matlab:

%Posiciones iniciales p1=[0 0 pi/2]; p2=[-2 2 pi/2]; p3=[2 -2 pi/2];	% USV 1 x1(1)=p1(1); y1(1)=p1(2); psi1(1)=p1(3); u1(1)=1; v1(1)=0; r1(1)=0;	% USV 2 x2(1)=p2(1); y2(1)=p2(2); psi2(1)=p2(3); u2(1)=1.5; v2(1)=0; r2(1)=0;	% USV 3 x3(1)=p3(1); y3(1)=p3(2); psi3(1)=p3(3); u3(1)=1.5; v3(1)=0; r3(1)=0;
---	---	---	---

Siguiendo la Trayectoria 1 especificada en la simulación de Control de seguimiento de trayectoria se obtienen las siguientes respuestas:

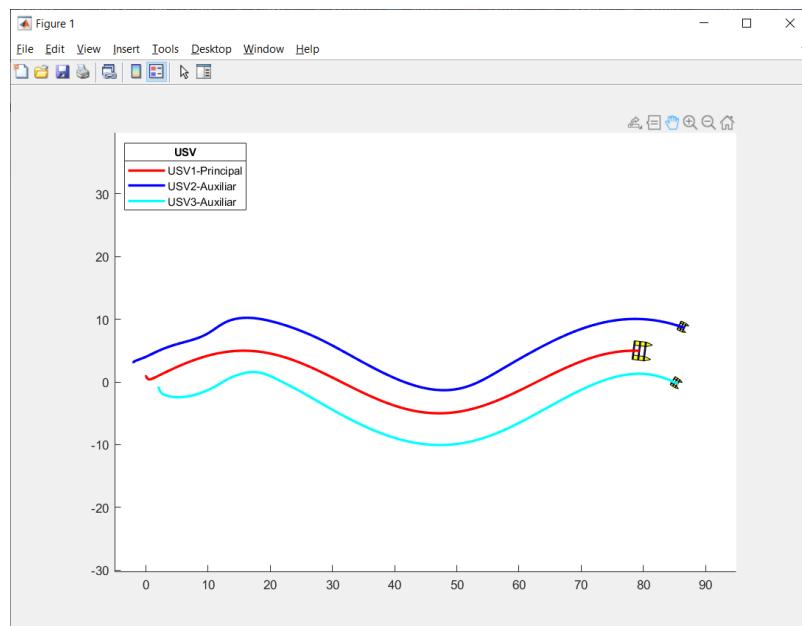


Figura 3.2.13. Resultados de la simulación del control de formación
Fuente: Propia

Como se observa en el resultado de la simulación, las posiciones iniciales de los USV auxiliares no tienen las distancias y ángulos deseados respecto al USV principal. Por ello, el control planteado corrige esta situación y ubica a los USV auxiliares en las posiciones deseadas durante toda la trayectoria del USV principal.

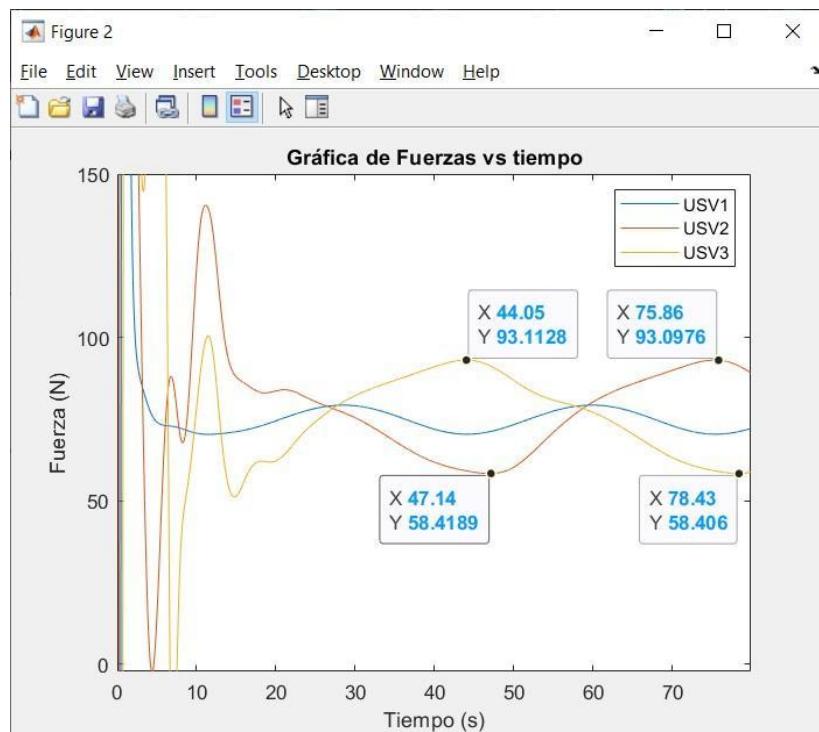


Figura 3.2.14. Gráfica de Fuerzas vs Tiempo

Fuente: Propia

Al no presentarse en las posiciones deseadas al inicio de la trayectoria, los USV auxiliares presentan un pico de fuerza al comienzo para iniciar el movimiento y ubicarse en las posiciones deseadas. Los valores de Fuerza oscilan entre 93 N y 58 N debido a que la trayectoria es sinusoidal.

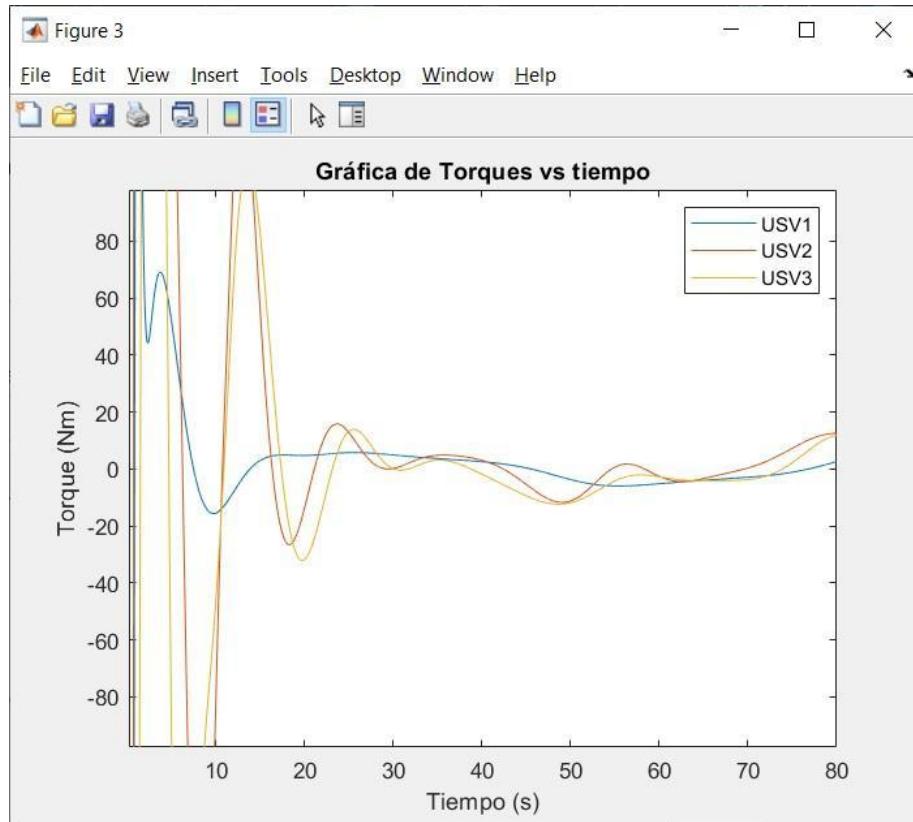


Figura 3.2.15. Gráfica de Torques vs Tiempo

Fuente: Propia

Los valores de Torque del USV1 y USV2 varian respecto a los giros que se realizan en la trayectoria sinusoidal. Además, ambos son similares debido a que deben girar casi al mismo tiempo para seguir con la posición deseada debido a la trayectoria del USV1, sin embargo, el giro es distinto para ambos USVs.

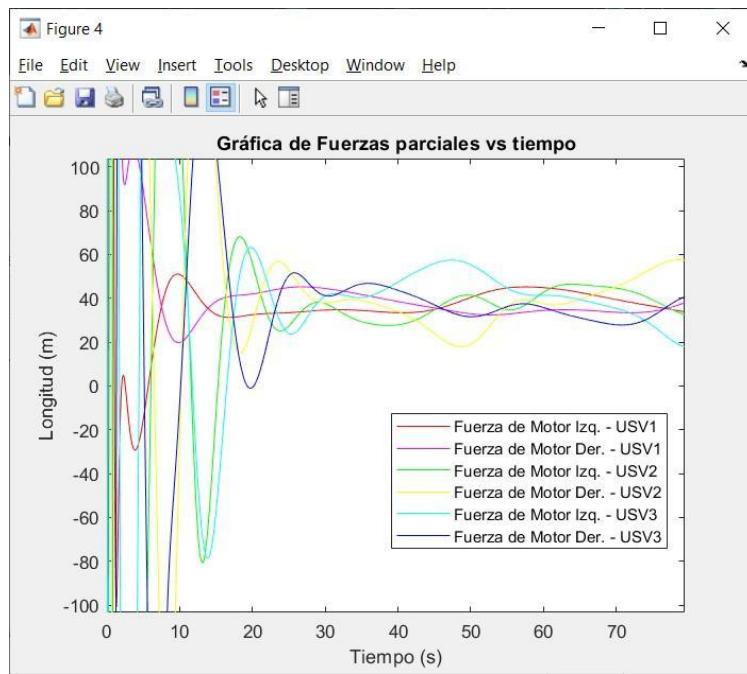


Figura 3.2.16. Gráfica de Fuerzas parciales vs Tiempo

Fuente: Propia

Los valores de la gráfica de fuerzas parciales oscilan entre 20 N y 60 N debido a los giros que deben hacer. En ocasiones las fuerzas del Motor Izquierdo y Derecho de cada USV tienen los mismos valores, por lo tanto, en ese punto la trayectoria se mantiene recta y no se presentan giros. Cuando se tienen distintos valores, se trata de giros del USV debido a obtener la posición deseada.

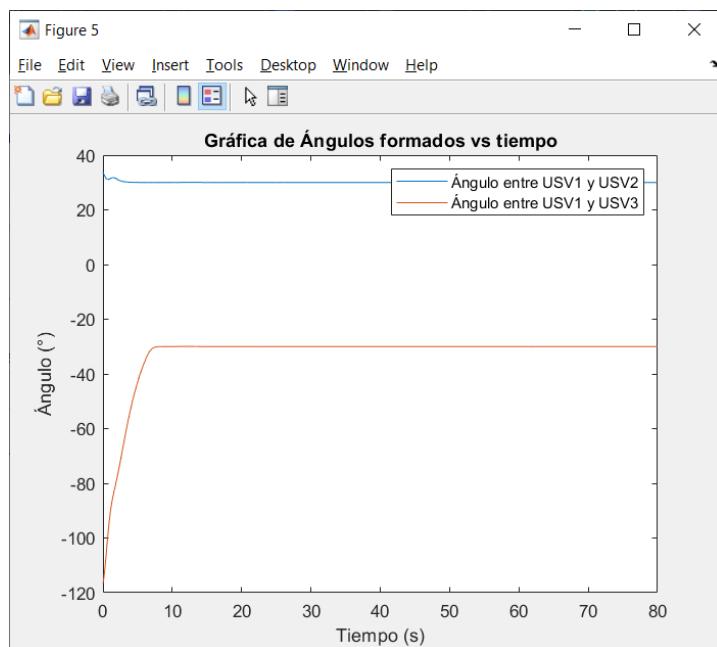


Figura 3.2.17. Gráfica de Ángulos formados vs Tiempo

Fuente: Propia

El ángulo desaseado entre el USV 1 y 2 es 30° y el USV1 y USV3 es -30° . En la gráfica de Ángulos formados vs tiempo se observa que los ángulos iniciales no son los deseados, por lo tanto, el USV trata de obtener el ángulo deseado en el menor tiempo posible, en este caso, 8 segundos.

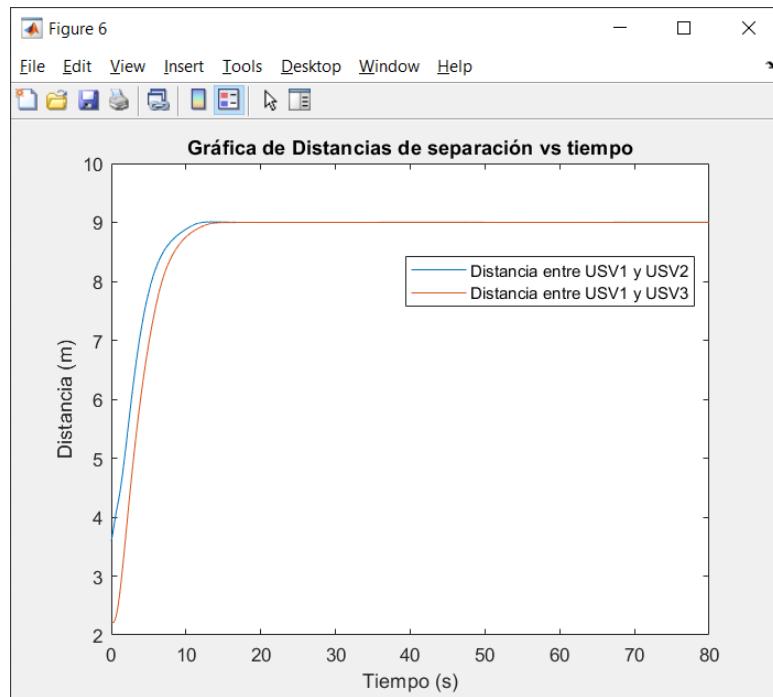


Figura 3.2.18. Gráfica de Distancias de separación vs Tiempo

Fuente: Propia

Las distancias deseadas entre cada USV son de 9 m y, como se observa al comienzo de la simulación, las distancias iniciales no son las deseadas. En 10 segundos aproximadamente, se obtienen las distancias deseadas entre cada USV.

EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA EN USV AUXILIAR

La simulación de esfuerzos realizada sobre el USV auxiliar fue hecha teniendo en cuenta las siguiente consideración:

- Se fijó uno de los cascos y se aplicó una fuerza de 180 N apuntando hacia arriba en la punta del casco opuesto, pretendiendo un caso crítico en el que un casco se mantiene quieto y el otro se levanta, ya que con el oleaje ocurre de manera similar, pero el oleaje son fuerzas que ocurren de manera periódica alrededor de los 100 a 150 N como una estimación.

Cabe mencionar que la simulación fue hecha en inventor y los joints fueron hechos por inventor en base a los constraints realizados y estos joints fueron revisados previos a la simulación.



Figura 3.2.19. Carga de 180 N en la parte delantera del casco izquierdo y casco derecho fijo.

Fuente: Propia

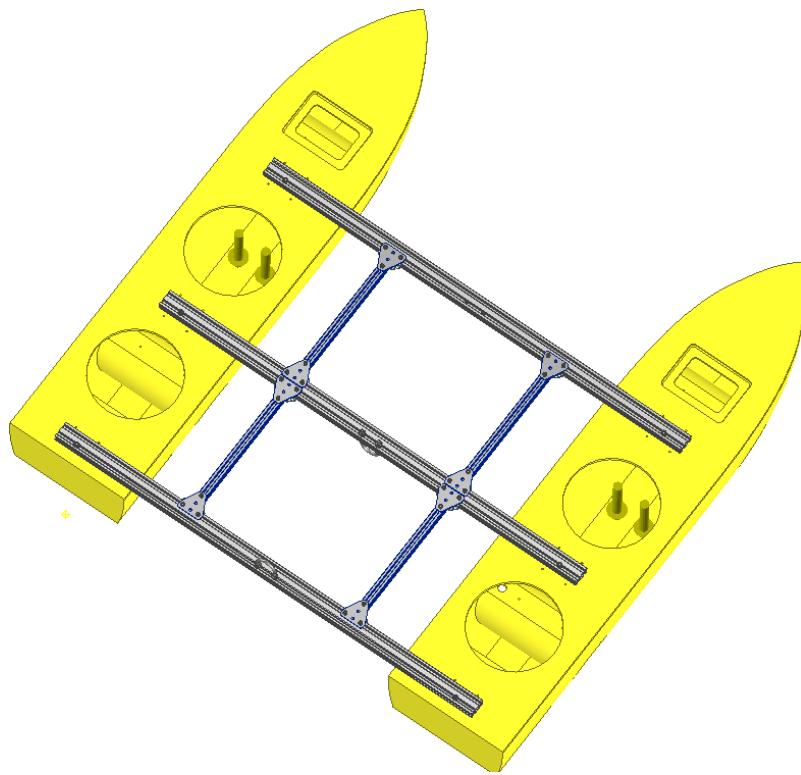


Figura 3.2.20. Carga de 120 N al interior de cada casco simulando el peso de las baterías y electrónica que lleva este dentro.

Fuente: Propia

Como se puede apreciar en la imagen de abajo, los máximos esfuerzos generados son en la unión encerrada de color rojo, puesto que es la primera resistencia ante la flexión ocasionada por la fuerza indicada, siendo de 248 MPa, pero el aluminio 6061 empleado en los VSlots o placas en T para la unión llega a soportar esfuerzos de hasta 271 MPa.

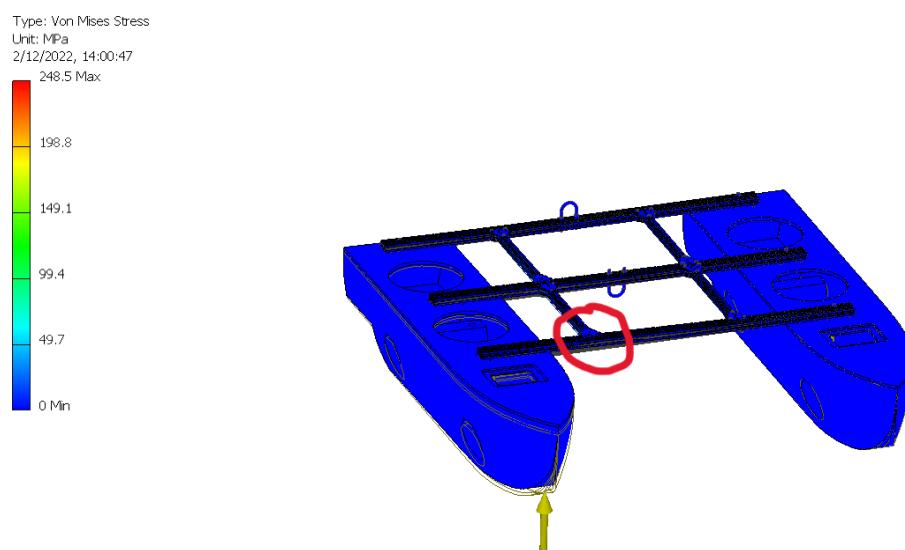


Figura 3.2.21. Simulación de esfuerzos del USV auxiliar

Fuente: Propia

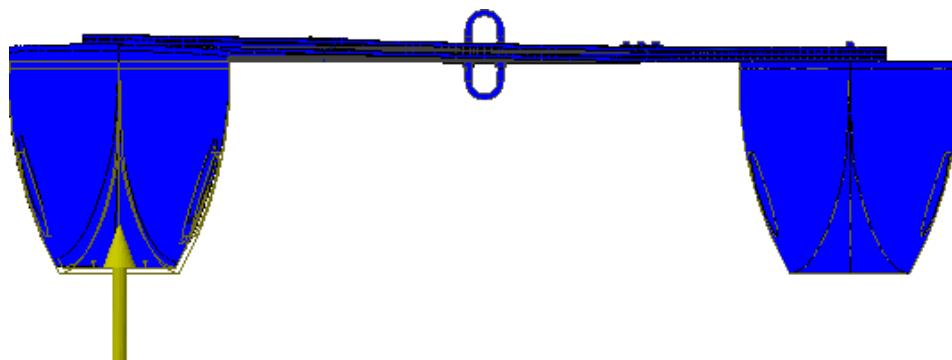


Figura 3.2.22. Vista frontal de la simulación de esfuerzos del USV auxiliar

Fuente: Propia

A continuación se puede ver un desplazamiento máximo de hasta 2.5 cm en el casco sobre el cual se aplica la fuerza, esto se pudo comprobar incluso en los cascos reales, la estructura puede soportar estos desplazamientos sin que se hayan ocasionado daños.

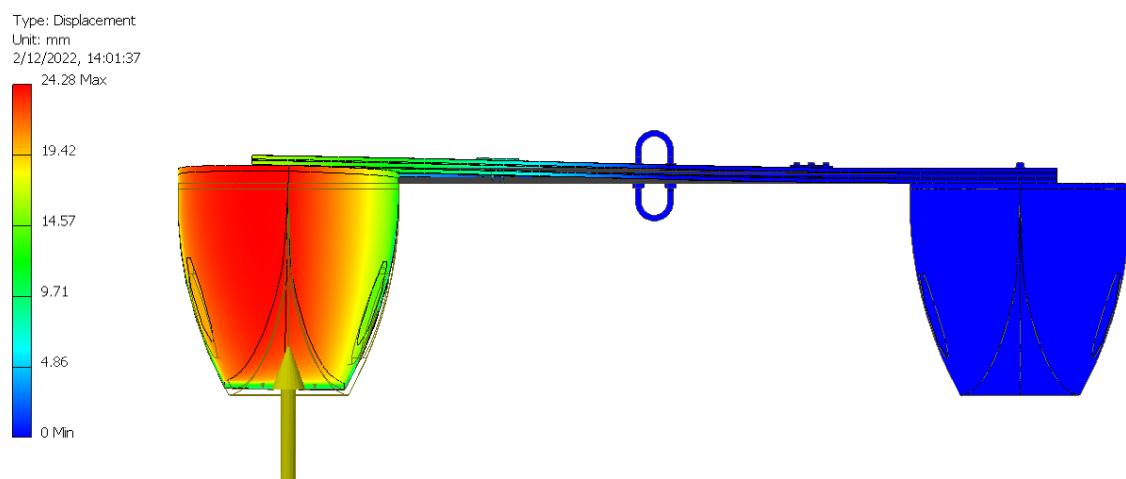


Figura 3.2.23. Desplazamiento del casco izquierdo tras la simulación de una carga de 180 N en la parte delantera del casco izquierdo

Fuente: Propia

En cuanto al factor de seguridad, se tiene uno de 1.11, lo cual asegura que no falle el sistema, pero es un factor bastante bajo; sin embargo, se debe tomar en cuenta que la carga puesta es una exageración de lo que se puede encontrar en el oleaje, además que el oleaje no proporciona sobre el casco una carga constante como se ha hecho de manera exagerada en la simulación para garantizar su integridad. Por lo que se estima un factor de seguridad mayor para el entorno en el que va a desarrollarse el USV.

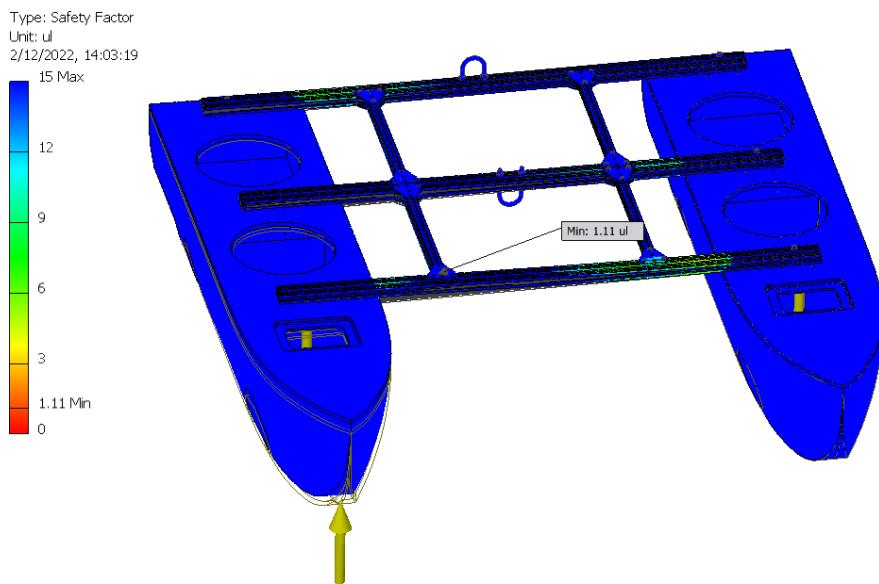


Figura 3.2.24 Factor de seguridad del USV auxiliar

Fuente: Propia

En la imagen de abajo se puede apreciar el cortador de aceite diseñado para dirigir el aceite hacia los tambores y evitar que se escape por en medio de estos, se colocó cargas de 80 N en las paredes en que el agua golpea directamente sobre la estructura diseñada y se puso los puntos fijos en las zonas en que iría empernado al Oil Skimmer. Obteniendo esfuerzos máximos de hasta 30 MPa, siendo bastante bajos para lo que el material (Aluminio 6061) puede aguantar, siendo este límite de 271 MPa.

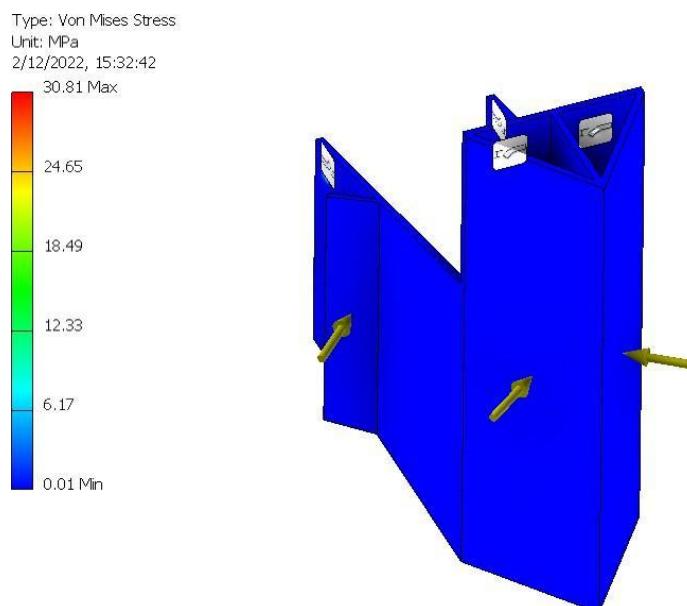


Figura 3.2.25. Cortador de aceite fijado en donde se emperna al Oil Skimmer y con cargas de 80 N en las partes que el agua impacta directamente sobre este.

Fuente: Propia

En cuanto a los desplazamientos de la estructura, pues no son nada alarmantes y son mostrados en la siguiente imagen:

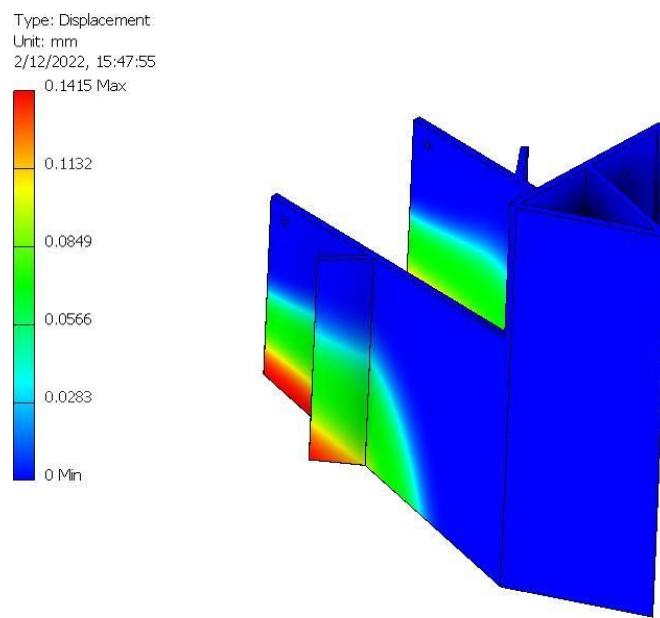


Figura 3.2.26. Desplazamientos del cortador de aceite ante la carga de 80 N simulada.
Fuente: Propia

Con respecto al factor de seguridad mínimo, este es de 8.9, siendo una estructura bastante confiable para el ambiente al cual va a estar sometida.

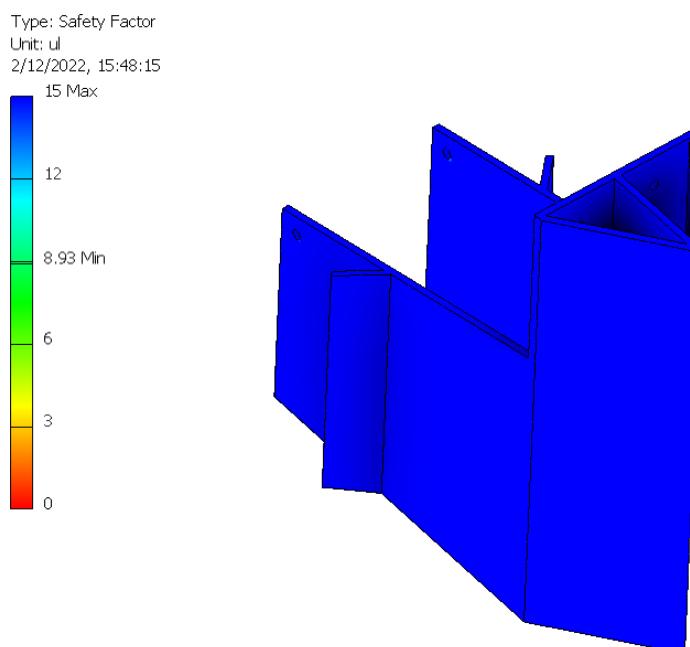


Figura 3.2.27. Factor de seguridad del cortador de aceite
Fuente: Propia

Pruebas de implementación de skimmer eléctrico montado sobre USV

Como parte de las validaciones de la implementación del sistema de limpieza de hidrocarburos, se llegó a validar el sistema de recuperación haciendo uso de un skimmer eléctrico montado sobre un USV a escala en una piscina. Aquí se colocaron diferentes tipos de hidrocarburos (aceite vegetal, aceite industrial y diesel) para demostrar la viabilidad y funcionamiento del sistema de recuperación. Siendo esta una prueba a escala con un equipo de menor envergadura que el real, se logró demostrar que el funcionamiento del sistema de skimmer es efectivo para la recuperación de diferentes tipos de hidrocarburos. En la Figura 3.2.28 se presentan algunas figuras de la validación realizada frente al personal de PNIPA.



Figura 3.2.28. Validación del sistema de recuperación de hidrocarburos en piscina.

Sistema de contención de hidrocarburos

El sistema final del skimmer hidráulico montado sobre un USV será validado e implementado en mar, ya que es un sistema de grandes dimensiones. El diseño final se presente en la Figura 3.2.29. Además en las Figura 3.2.30 se presenta los componentes del sistema de contención que serán montados al skimmer hidráulico y al USV principal.



Figura 3.2.9. Componentes del sistema de Oil Skimmer y USV principal.



Figura 3.2.30. Componentes del sistema de contención (vejiga remolcable y boyas).

4.0. CONCLUSIONES

- Considerando la tasa de recolección de petróleo del skimmer TDS118 usado en este sistema y la capacidad de almacenamiento de petróleo del contenedor inflable posterior (1000 galones), se puede concluir que el sistema propuesto tiene la capacidad de solucionar los derrames de petróleo de magnitud pequeña a mediana (cerca a los 10000 barriles) operando de manera continua alrededor de 2 semanas.
- Además, ya que se usan métodos de recolección con materiales oleofílicos, se puede concluir que el sistema propuesto puede recolectar hasta 4 tipos de aceites (muy ligeros, ligeros, medios y pesados), entre ello se encuentra la gasolina, diesel, aceite crudos, entre otros; por lo tanto soluciones resulta ser eficaz contra la problemática planteada al inicio.
- De acuerdo a las simulaciones realizadas, mostradas en los Anexos, se puede concluir que se diseñó una estructura para el USV auxiliar, que, además de soportar los impactos de las olas de mar que son características del entorno en el que se desplegará este sistema, permite la sujeción segura de las barreras flotantes de petróleo que estarán ubicados en la parte posterior de los USV delanteros.
- De los resultados obtenidos en las pruebas de control, se concluye que se tiene listo el algoritmo de navegación y control de formación para operar remotamente los movimientos del USV principal y operar automáticamente los movimientos de los USV auxiliares, por medio de señales que llegan entre los USVs usando transmisores y receptores de Radio Frecuencia.
- Se logró ponerse en contacto con distintos proveedores para tener la cotización de distintos materiales y componentes electrónicos, de esa manera se procedió a gestionar la compra con los costos estimados anteriormente.

5.0 RECOMENDACIONES

- Como recomendación para futuros trabajos, se puede mejorar e implementar en este sistema algoritmos de navegación autónoma y automatizar el desplazamiento de los 3 USV, solo se requerirá a un operario para que monitoree el correcto funcionamiento de la flota.

6.0. BIBLIOGRAFÍA

Vista de Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones | I+D Tecnológico. (s. f.). Recuperado 21 de octubre de 2022, de <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/2907/4017>

HobbyKing. (s. f.). *Turnigy High Capacity 20000mAh 4S 12C Lipo Pack w/XT90.* Hobbyking. Recuperado 21 de octubre de 2022, de https://hobbyking.com/es_es/turnigy-high-capacity-battery-20000mah-4s-12c-drone-lipo-pa_c_k-xt90.html?queryID=c84a4c01a02a61760780081291d1237a&_store=es_es

Keeping, S. (2020). *Usar convertidores CC-CC aislados con transformadores incorporados para facilitar el montaje.* Digi-Key.
<https://www.digikey.com/es/articles/use-isolated-dc-dc-converters-with-embedded-transformers-to-ease-assembly>

Sodimac. (2021). *Piscina estructural rectangular 400x211x81cm 5700L.*

Falabella.

https://sodimac.falabella.com.pe/sodimac-pe/product/113320319/Piscina-estructural-rectangular-400x211x81cm-5700L/113320324?exp=sodimac&rid=Recs%21PDP%21PE_F.com%21Rec%21Productos_Similares_resto%21Vistos_Juntos_Ctrl%21113320635%21113320324%214%2118

Falabella. (2022). *Set De Piscina Estructural Pow.* Fallabela.com.

https://www.falabella.com.pe/falabella-pe/product/16595907/Set-De-Piscina-Estructural-Pow_/_16595907?kid=shopp21fc&disp=1&pid=Google_w2a&gclid=CjwKCAjw7p6aBhBiEiwA83fGuio7YZcSxD4-KPqcXeKxT9_6VNd-allF4SKTsD48WT1Q8OnK1oKaGhoCAgcOAvD_B

wE

Cross, N. (2008). *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design* (4.a ed.). John Wiley & Sons Inc.

Oceana. (15 de febrero del 2022). *¿Cómo afecta económicoamente el derrame de petróleo a la pesca artesanal de Ancón y Chancay?*. Recuperado de:
<https://peru.oceana.org/blog/como-le-afecta-economicamente-el-derrame-de-petroleo-a-la-pesca-artesanal-de-ancon-y-chancay/>

Sea machines.(agosto del 2018). *Autonomous Spill-Response Vessel*. Recuperado de
<https://sea-machines.com/sea-machines-successfully-deploys-industrys-first-autonomous-spill-response-vessel-fulfills-agreement-with-marad/>

Knud E.Hansen. (2022) *Shallow Water Oil Recovery vessel*. Recuperado de:
<https://www.knudehansen.com/reference/sworc/>

Jhonson, G., Grayson, G., & Stromlund, A. (2017). *Innovative Oil Spill Recovery Technology Developments*. International Oil Spill Conference Proceedings. Recuperado de
<https://meridian.allenpress.com/iosc/article/2017/1/1382/198076/Innovative-Oil-Spill-Recovery-Technology>

Sea Swarm. (s. f.). Senseable MIT. Recuperado 6 de abril de 2022, de <http://senseable.mit.edu/seaswarm/>

Shah, M., Shah, S., & Shah, M. (2018). Autonomous Robotic Vehicle for Oil Spills cleaning with Nano Particles. *2018 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*, 1(1), 1–6.
<https://doi.org/10.1109/MARSS.2018.8481166>

Markleen. (2020). *Recuperacion Hidrocarburos MultiSkimmers MS 60 | MARKLEEN*.
<https://markleen.com/es/soluciones-derrames/skimmers-multi-skimmers-60/>

ITOPF. (2012). *Use of skimmers in oil pollution response*.
<https://www.amn.pt/DCPM/Documents/TIP%205%20Use%20of%20Skimmers%20in%20Oil%20Pollution%20Response.pdf>

Grill, P., & Linde, F. (2013). *Oil Skimming* [Master of Science Thesis]. KTH Industrial Engineering and Management.

<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:644788/FULLTEXT01.pdf>

44.24€ |Hélice subacuática de gran empuje, 24V, modelo de barco, Robot submarino|Accesorios y piezas para instrumentos| - AliExpress. (s. f.). aliexpress.com. Recuperado 6 de abril de 2022, de <https://es.aliexpress.com/item/33031473876.html>

117.42€ |1 unidad de bomba de chorro de agua de 24mm con paleta de 4 aspas CNC 3674 propulsor de pulverización de Motor sin escobillas para Motor de chorro modificado RC Boat

Turbo|Partes y accesorios| - AliExpress. (s. f.). aliexpress.com. Recuperado 6 de abril de 2022, de <https://es.aliexpress.com/item/4000091633420.html>

¿Qué son las células de combustible? (s. f.). ComercialFoisa. Recuperado 6 de abril de 2022, de <https://comercialfoisa.com/que-son-las-celulas-de-combustible/>

Baterías Recargables de Li-Ion 20Ah Amp horas. (s. f.). eBay. Recuperado 6 de abril de 2022, de https://pe.ebay.com/b/Li-Ion-Rechargeable-Batteries-20Ah-Amp-Hours/48619/bn_87929137

Brown, C. E. (s. f.). *Oil-spill Remote Sensors: New Tools that Provide Solutions to Old Problems.* bsee.gov. Recuperado 6 de abril de 2022, de <https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/osrr-oil-spill-response-research/161bf.pdf>

Brown, C. E., & Fingas, M. F. (1998). *Oil-spill Remote Sensors: New Tools that Provide Solutions to Old Problems.* <https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/osrr-oil-spill-response-research/161bf.pdf>

C3 Submersible Fluorometer | Turner Designs | United States. (s. f.). Turner Designs. Recuperado 6 de abril de 2022, de <https://www.turnerdesigns.com/c3-submersible-fluorometer>

Chen, Y.-Q. Wang, Z. (2005). "Formation control: a review and a new consideration," 2005 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst., no. 435, pp. 3181–3186.

Dave. (2011). Remediation Technologies for Marine Oil Spills: A Critical Review and Comparative Analysis. *American Journal of Environmental Sciences,* 7(5), 424–440. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2011.424.440>

Delgado, E. (s. f.). *Diseño de una instalación y alimentación eléctrica de un comedor industrial por medio de generación distribuida.* Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado 6 de abril de 2022, de http://132.248.9.195/ptb2010/julio/0659687/0659687_A1.pdf

Durand, J. (2016). *Diseño y simulación de un sistema de control de formación de vehículos autónomos marítimos de baja velocidad.* Pontificia Universidad Católica del Perú

Kakalis, N. M., & Ventikos, Y. (2008). Robotic swarm concept for efficient oil spill confrontation. *Journal of Hazardous Materials,* 154(1–3), 880–887. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.112>

Deutsche Welle (www.dw.com). (s. f.-a). *Perú rescata más de 420 aves afectadas por derrame de Repsol.* DW.COM. Recuperado 6 de abril de 2022, de <https://www.dw.com/es/per%C3%BA-rescata-m%C3%A1s-de-420-aves-afectadas-por-derrame-de-petr%C3%B3leo-de-repsol/a-61035934#:~:text=Am%C3%A9rica%20Latina,-Per%C3%BA%20rescata%20m%C3%A1s%20de%20420%20aves%20afectadas%20por%20derrame%20de,fue%20apuntado%20como%20principal%20responsable>.

Fahimi, F. (2009). *Autonomous Robots. Modeling, Path Planning and Control.*

- Gadea, G. (2004). *Los buques tanque y su clasificación*.
<http://biblioteca.iapg.org.ar/archivosadjuntos/petrotecnia/2004-2/losbuques.pdf>
- Highland Tank. (2013). PETROLEUM & CHEMICAL STORAGE TANKS. *HIGHLAND TANK*. Recuperado 8 de abril de 2022, de
https://can-am.net/wp-content/uploads/petroleum_chemical_storage_tanks.pdf
- Hoang, A. T., Pham, V. V., & Nguyen, D. N. (2018). A Report of Oil Spill Recovery Technologies. *Research India Publications*, 13(7). https://www.ripublication.com/ijaer18/ijaerv13n7_44.pdf
- INTRODUCCIÓN A LA MAGNETOHIDRODINÁMICA*. (s. f.). TDX. Recuperado 6 de abril de 2022, de
https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6280/13anex_1.pdf;jsessionid=D3FB0EAE7319E36C159F1B5973E30F37?sequence=13
- Krug, L. (2021, 17 noviembre). *Balsas salvavidas: tipos y características*. Escuela Náutica Neptuno. Recuperado 8 de abril de 2022, de <https://www.neptuno.es/tipos-de-balsas-salvavidas/>
- NOAA. (s. f.). *How does oil impact marine life?* Ocean Service. Recuperado 6 de abril de 2022, de
<https://oceanservice.noaa.gov/facts/oilimpacts.html>
- Meza, M. A. (2015). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT ACUÁTICO*. Universidad piloto de Colombia. Recuperado 6 de abril de 2022, de
<http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00002151.pdf>
- Muñoz, E. (2021, 30 abril). *Técnicas Recuperación Derrames Petróleo En El Mar | MARKLEEN*. Markleen. Recuperado 8 de abril de 2022, de
<https://markleen.com/es/respuestas-derrames/limpieza-derrames-petroleo-mar/>
- NAUTICALIR. (2022). *Embarcación / Lancha para Pesca Argos 18 Pies Estándar*. Recuperado 8 de abril de 2022, de
<https://www.nauticalir.com/products/embarcacion-lancha-para-pesca-argos-18-pies-estandar>
- Vigneshwaran, S., & Yuvaraj, K. (2021). Fabrication and performance evaluation of semi-autonomous oil spills removing robots. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1305–1307. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.285>
- Oyola, J. S., & Gordillo, G. (2007). *Estado del arte de los materiales fotovoltaicos y de la tecnología solar fotovoltaica*. Universidad Autónoma del Caribe.
<https://www.redalyc.org/pdf/4962/49625111003.pdf>
- OXFAM & CNDDHH. (2020, febrero). *Informe de los derrames petroleros en la Amazonía peruana entre el 2000 y el 2019*.
https://oi-files-cng-prod.s3.amazonaws.com/peru.oxfam.org/s3fs-public/file_attachments/La-sOMBRA-del-petroleo-esp.pdf

Pereira, N. (2020, junio). *Tipos de propulsión en los remolcadores portuarios y su aplicación.*

Universidad de Oviedo.

https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/56221/TFM_NoeliaPereiraCabeza.pdf?jsessionid=C616FD4AA7828BCB5FE2C2DCAA4DBF8C?sequence=6

Petroleum and chemical storage tanks. (s. f.). Highland tanks. Recuperado 6 de abril de 2022, de
https://can-am.net/wp-content/uploads/petroleum_chemical_storage_tanks.pdf

Pärt, S. (2021, 30 noviembre). *Oil Spill Detection Using Fluorometric Sensors: Laboratory Validation and Implementation to a FerryBox and a Moored SmartBuoy*. Frontiers. Recuperado 8 de abril de 2022, de
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2021.778136/full>

Rodriguez, P. (2013, diciembre). *DISEÑO DE UNA EMBARCACIÓN DE 7 METROS DE loA*. UPC.
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/20357/Dise%20o%20de%20una%20embarcaci%20n%20de%207%20metros%20de%20LOA.pdf?sequence=1>

Sea Swarm. (s. f.). Senseable MIT. Recuperado 6 de abril de 2022, de <http://senseable.mit.edu/seaswarm/>

Shah, M., Shah, S., & Shah, M. (2018). Autonomous Robotic Vehicle for Oil Spills cleaning with Nano Particles. *2018 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*, 1(1), 1–6. <https://doi.org/10.1109/MARSS.2018.8481166>

Spda, W. (2022, 10 febrero). *Derrame de petróleo en la costa peruana: puntos claves para entender el desastre ambiental | SPDA Actualidad Ambiental*. SPDA Actualidad Ambiental |. Recuperado 6 de abril de 2022, de
<https://www.actualidadambiental.pe/derrame-de-petroleo-en-ventanilla-puntos-claves-para-entender-el-desastre-ambiental/>

Trout, J. (2019, 17 septiembre). *Oil Storage Containers and Dispensing Systems*. Machinery Lubrication.
<https://www.machinerylubrication.com/oil-storage-containers-and-dispensing-systems-31651>

Turner Designs. (s. f.). *C3 Submersible Fluorometer*. Recuperado 8 de abril de 2022, de <https://www.turnerdesigns.com/c3-submersible-fluorometer>

Turner, T. (2012, 21 mayo). *Sea Cleaning Drones*. Yanko Design - Modern Industrial Design News. Recuperado 8 de abril de 2022, de
<https://www.yankodesign.com/2012/05/21/sea-cleaning-drone/>

United Nations Environment Programme. (s. f.). *How to manage the damage from oil spills*. UNEP. Recuperado 6 de abril de 2022, de
<https://www.unep.org/news-and-stories/story/how-manage-damage-oil-spills>

Venator. (2021). *Bote Enrollable – Botes Venator*. Venator Acuatic. Recuperado 8 de abril de 2022, de <https://venator.pe/producto/bote-enrollable/>

A. ANEXO A: MEMORIA DE CÁLCULO

A.1. Cálculos mecánicos - USV auxiliar

Se presentarán los cálculos realizados para el dimensionamiento de los cascos paralelos del USV y el cálculo de la fuerza de propulsión requerida por los Thrusters para desplazar al sistema a una velocidad de 100 cm/seg.

- Dimensionamiento de los cascos paralelos del USV auxiliar

En el dimensionamiento de los cascos se consideró la teoría brindada en el libro “Basic Ship Theory” y la guía de diseño “How to dimension a sailing catamaran?” de Terho Halme

Como primer paso del método de diseño, se deben suponer las dimensiones principales, las cuales son: la longitud del plano de agua en el casco L_{WL} , ancho del plano de agua B_{WL} y la altura sumergida del casco T . Luego con estas dimensiones se debe verificar que el volumen

de líquido desplazado por el casco sumergido, según el principio de Arquímedes, cause una fuerza de empuje que iguale o supere al peso de todo el sistema. Si esto no se cumple, se deben cambiar las dimensiones del casco y repetir el cálculo de la fuerza de empuje.

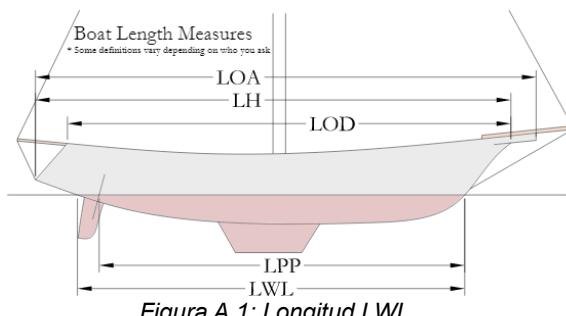


Figura A.1: Longitud LWL

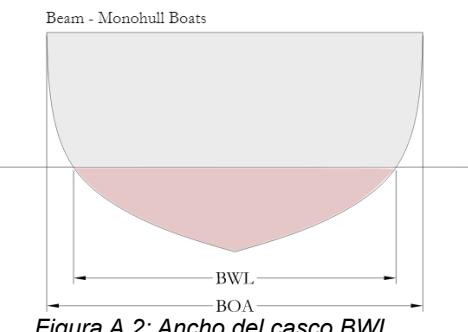


Figura A.2: Ancho del casco BWL

Beam - Multihull Boats

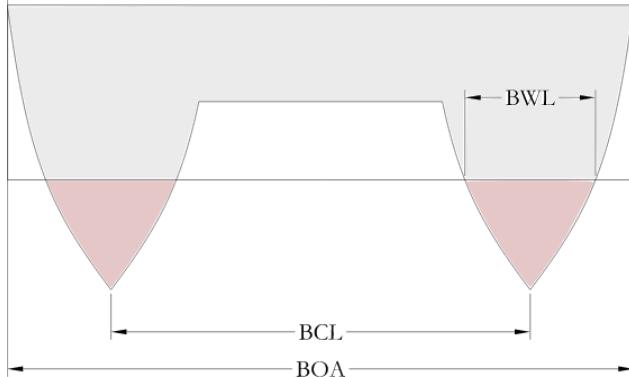


Figura A.3: Distancia entre cascos.

Otras características necesarias para el dimensionamiento son: el área del plano de agua (A_w), el área media (A_m) y el volumen desplazado (Δ). Estas dimensiones se observan en las siguientes figuras, en donde la parte sumergida del casco está sombreada

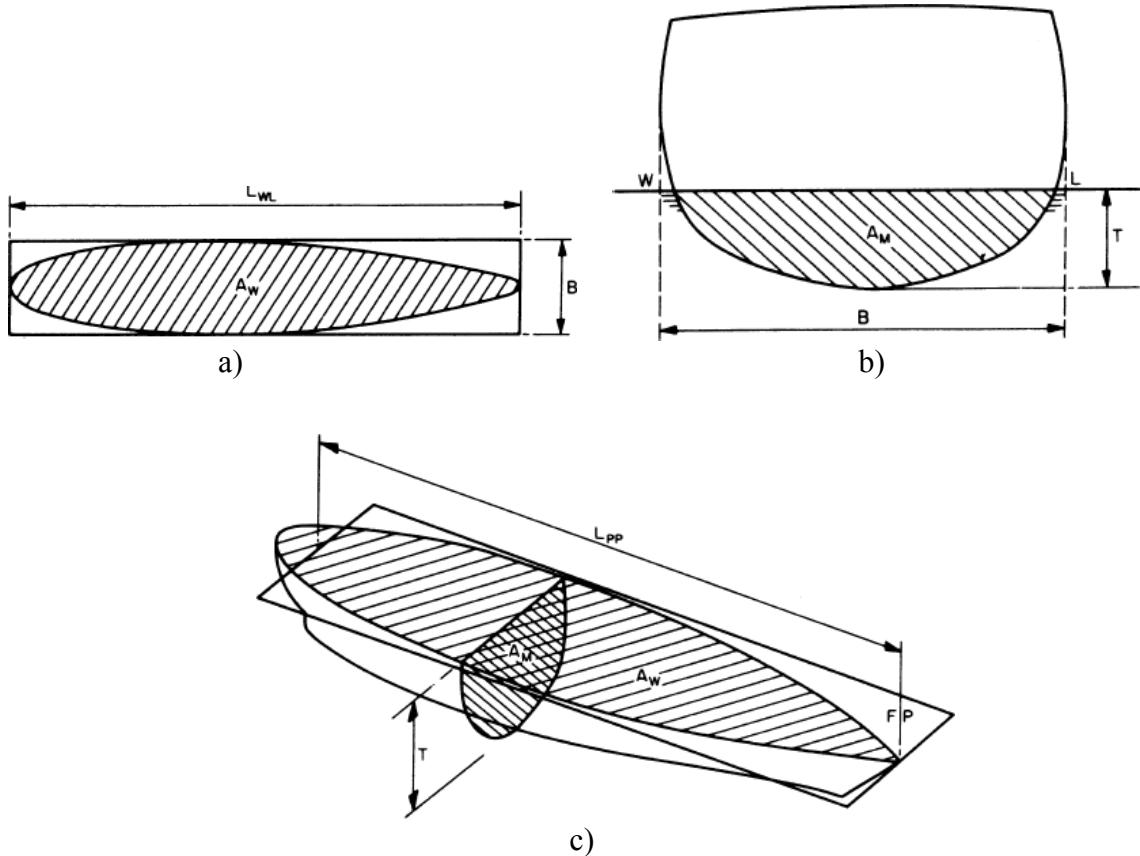


Figura A.4: Diagramas para cálculo

Para nuestro caso, como primer diseño se han supuesto las siguientes medidas:

$$L_{WL} = 1.256 \text{ m}, \quad B_{WL} = 0.2 \text{ m} \text{ y} \quad T = 0.225 \text{ m. Seg\'un el modelo}$$

$$= 0.042 \text{ m} \quad \text{y } A_M = 0.257 \text{ m.}$$

software Inventor, los valores de las \'areas son: A_M

Habiendo conseguido estos datos, se calculan los coeficientes caracter\'isticos del dise\~no del casco:

$$C_M = \frac{A}{B * T} = \frac{0.042}{0.2 * 0.225} = 0.95$$

$$C_p = \frac{A}{A_M * L_{LW}}$$

$$C = \frac{A}{B_{WL} * C_{LW}}$$

$$\text{, dado que en promedio } C \text{ deber\'ia ser 0.88, se halla el volumen}$$

$$* T * L$$

$$= 0.88 * 0.2 * 0.225 * 1.256 = 0.0532 \text{ m}^3$$

Entonces, la carga m\'axima que pueden soportar sin hundirse los 2 cascos a usar ser\'a:

$$m_{LDC} = 2 * \Delta * \rho = 109 \text{ kg , donde } \rho \text{ es la densidad del agua: } \rho = 1025 \text{ kg/m}^3$$

Dado que la masa total del sistema, incluyendo el contenedor cuando est\'a lleno de 64 kg de petr\'oleo, es igual a aproximadamente 100 kg, se comprueba que los cascos dise\~nados podr\'an soportar todo el peso del USV.

- C\'alculo de los propulsores:

Para hallar la cantidad de propulsores a usar se debe hallar la fuerza de propulsión necesaria para mover todo el sistema a una velocidad determinada. En la Figura 2.21, se muestra el diagrama de cuerpo libre del casco, donde m_{CASCO} y m_{extra} es la masa del casco y de los demás componentes respectivamente, a es la aceleraci\'on del casco en m/s^2 . Es la resistencia que aplica el agua hacia el casco en direcci\'on contraria a su movimiento y F_p es la fuerza de propulsión que proporcionan los Thrusters de h\'elices.

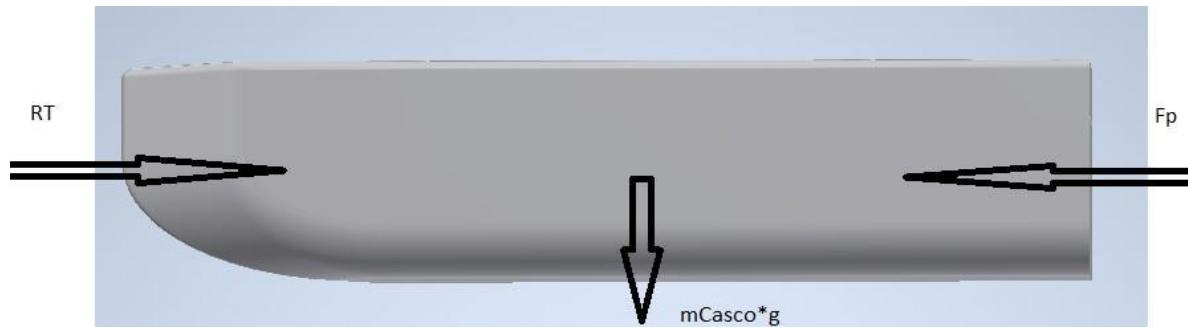


Figura A.5: DCL del casco

Según las leyes de Newton: $ZF = -R_T + 2 \cdot F_p = (m_{casco} * 2 + m_{extra}) \cdot a$

$$F_p = (R_T + m_{TOTAL} * a) / 2$$

Para hallar la resistencia total R_T del agua se debe calcular el coeficiente de resistencia total:

$$CT = C_F + C_A + C_{AA} + C_R$$

Donde:

CT : Coeficiente de resistencia total

CF : Coeficiente de resistencia a la

fricción CA : Coeficiente de resistencia

incremental CAA : Coeficiente de

resistencia del aire CR : Coeficiente de

resistencia residual

La resistencia del agua vendrá $RT = 0.5 \cdot C_T \cdot \rho \cdot S \cdot V^2$
dada por:

Donde:

RT : Resistencia total

CT : Coeficiente de
resistencia total

S : Superficie o área en contacto con el fluido

V : Velocidad del barco

ρ : Densidad del fluido

Para hallar el área de contacto con el fluido, se usa el modelo 3D en el software Inventor, de donde se obtiene: $S = 0.7676 \text{ m}^2$

Luego se calcula el coeficiente de fricción C_F con ayuda del número de Reynolds

$R_n = \frac{\rho * V * L}{\mu}$, donde μ es la viscosidad dinámica del fluido circundante, en este caso, el agua tiene $\mu = 1.307 * 10^{-3} Pa * s$, y la velocidad V del USV será de 1.5 m/s.

Entonces, $R_n = \frac{1025 * 3 * 1.256}{1.307 * 10} = 1.477 * 10^3$, por tanto el flujo se considera turbulento.

$$\text{Además, } C_F = \frac{0.075}{(\log(R_n) - 2)} = 0.0043$$

$$F = \frac{0.0043}{(\log(2.995 * 10) - 2)}$$

Los valores de resistencia incremental C_A y resistencia al aire C_A se toman constantes por simplicidad.

$$C_A = -0.0001$$

$$C_{AA} = 0.0007 \text{ (para vehículos pequeños)}$$

el coeficiente de resistencia residual (CR) se calcula de la siguiente forma:

$$CR = C_{R,Diagram} + C_{R,B/T \neq 2.5}$$

Donde:

$C_{R,Diagram}$: Coeficiente residual en base al número de Froude

$C_{R,B/T \neq 2.5}$: Coeficiente residual relación ancho - altura

Usando la siguiente gráfica, se halla $C_{R,Diagram}$, el cual está en función del Número de Froude F y la razón de longitud-desplazamiento M

$$F = \frac{V}{\frac{\rho}{\mu} \frac{L}{D}} = \frac{1.5}{1.5} = 0.427$$

$$M = L \quad \frac{1}{\Delta_{WL}}^{1/3} = 1.256 / 0.0532^{1/3} = 3.339$$

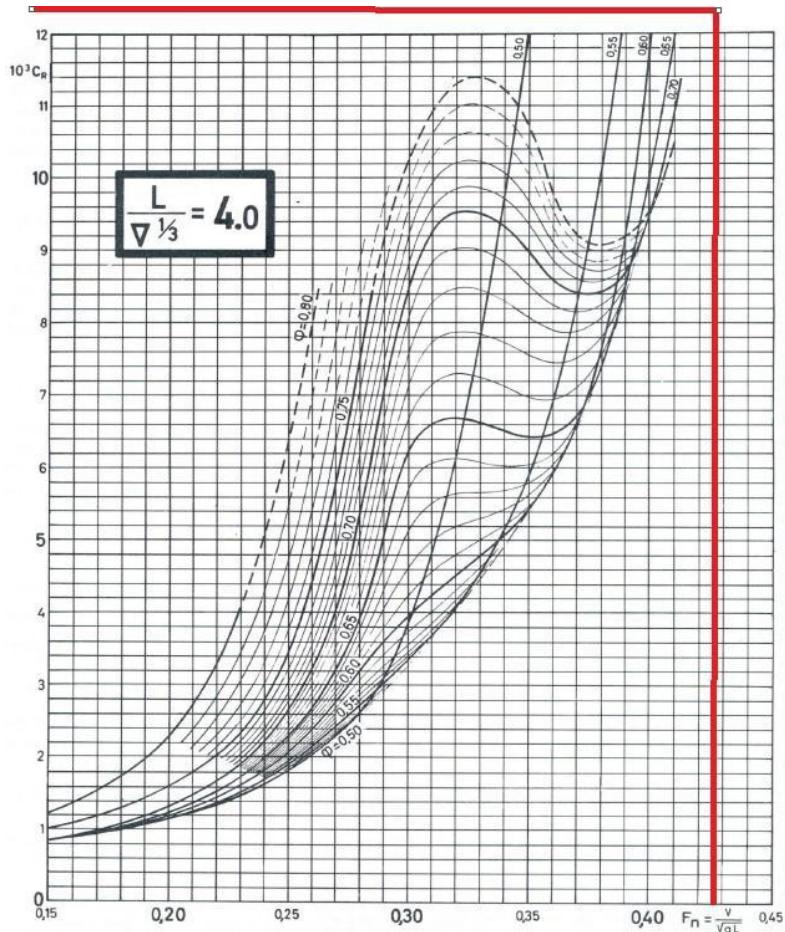


Figura A.6: Diagrama CR vs Fn

De esta manera, se obtiene $C_{R,Diagram} = 0.015$

Además,

$$C_{R,B/T \neq 2.5} = 0.16 * \left(-\frac{\frac{B}{C}}{\frac{WL}{C}} - 2.5 \right) * 10^{-3} = 0.16 * \left(-\frac{0.2}{0.225} - 2.5 \right) * 10^{-3}$$

$$C_{R,B/T \neq 2.5} = -0.000258$$

Posteriormente, se halla el coeficiente de resistencia total

$$\begin{aligned} CT &= C_F + C_A + C_{AA} + C_R \\ &= 0.0043 + -0.0001 + 0.00007 + (0.015 - 0.000258) \end{aligned}$$

$$CT = 0.019$$

La Resistencia total del agua y del petróleo viene dada por: $R_T = 0.5 \cdot C \cdot \rho \cdot S \cdot V^2$

$$R_T = 0.5 * 0.019 * 1025 * \frac{2}{0.7676 * 1.5} \text{ entonces } R_T = 16.84 N$$

Debido a que son 2 cascos a R_T entonces los que se aplica

$$R_{total} = 2 * 16.84 = 33.68 N$$

Finalmente, la masa total del sistema será aproximadamente de 50 kg y la aceleración será $a = 0.01 m/s^2$, por tanto, la fuerza F_p que debe proporcionar cada propulsor será igual a

proporcionar cada propulsor será igual a

$$F_p = (R_{total} + m_{TOTAL} * a) / 2 = (33.68 + 100 * 1) / 2 = 7.79 N \text{ o}$$

$$\text{equivalentemente } F_p = 0.79 kgf$$

A.2. Cálculos eléctricos - USV auxiliar

A.2.1. Cálculo de potencia de las baterías - USV auxiliar

Para realizar los cálculos de potencia se tomó en cuenta los componentes electrónicos requeridos para el sistema: Microcontrolador, Sensor IMU, Sensor GPS, Módulo de Comunicación XBee, Thruster T200 y su controlador de velocidad. El cálculo de potencia se realiza obteniendo el producto del voltaje y corriente requerida de cada componente. Como se observa en la Tabla 7, el Thruster T200 junto con su controlador de velocidad consumen la mayor parte de potencia del sistema.

Tabla A.2.1. Cálculo de potencia

Fuente: Propia

CALCULO DE POTENCIA								
COMPONENTE	MODELO	CANTIDA D	VOLTAJE	UNIDAD	AMPERAJ E	UNIDAD	POTENCIA	UNIDA D
Microcontrolador	ARDUINO MEGA 2560	1	5	V	0,1	A	0,500	W
Sensor IMU (mag. + acel. + giro.)	MPU 9250	1	5	V	0,004	A	0,020	W
Sensor GPS	UBLOX NEO 8-M	1	3,3	V	0,067	A	0,221	W
Módulo Comunicación XBee	XBEE PRO 900HP	1	3,3	V	0,215	A	0,710	W

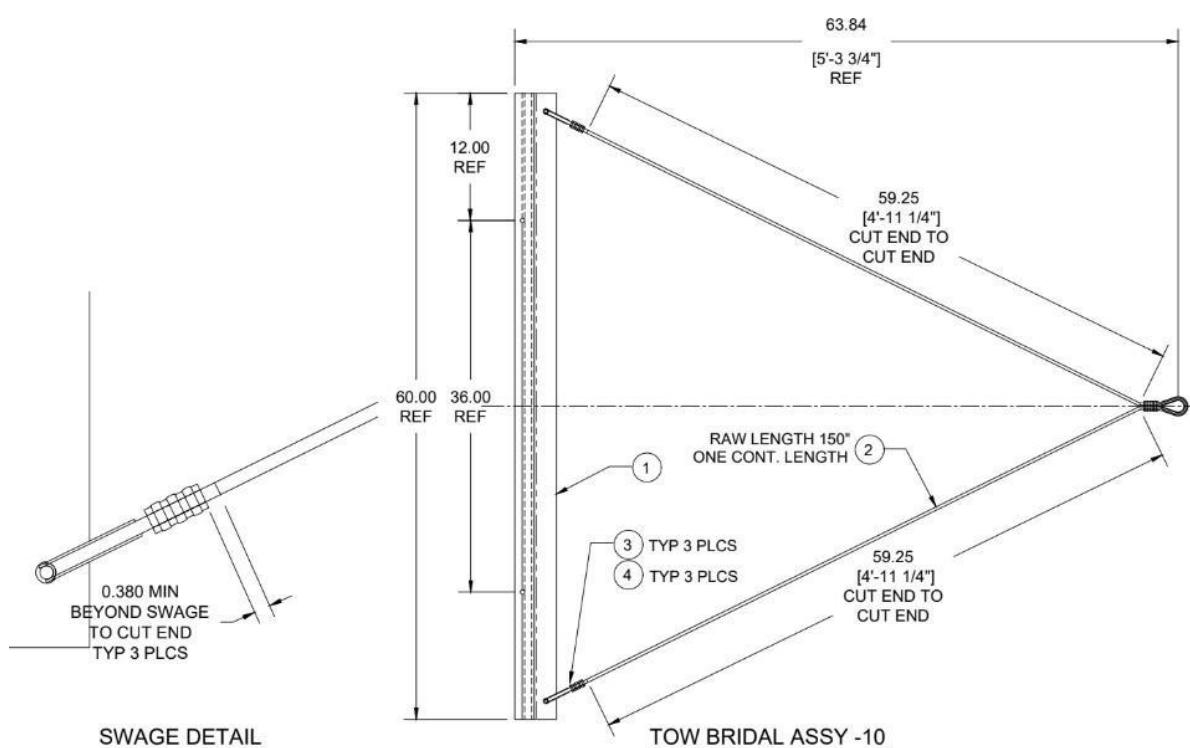
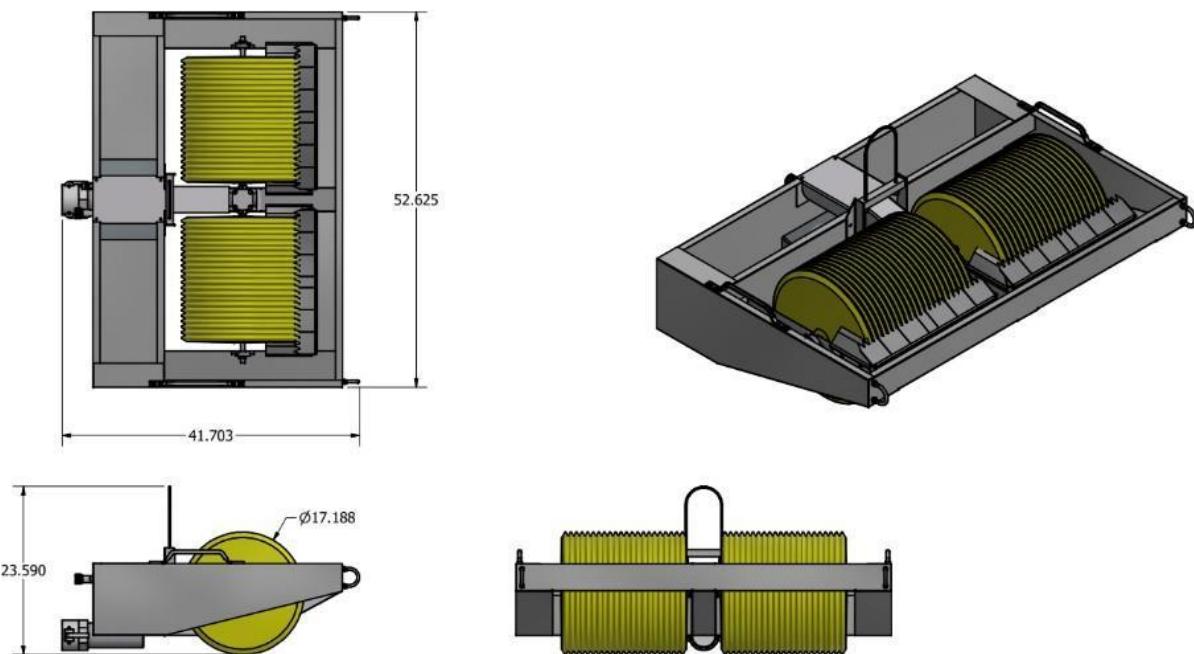
Electronic Speed Controller + Thruster T200	T200 Blue Robotics	2	12	V	16	A	192,000	W
--	-----------------------	---	----	---	----	---	---------	---

					TOTAL	384,451	W

Calculado el consumo total de potencia, el tipo de baterías elegido es de Acido plomo, con una capacidad de 25 Ah y 12 V, por lo que se tiene $25 \times 12 = 300$ Wh, entonces para alcanzar el total calculado, se requiere 2 baterías por cada USV auxiliar.

B. ANEXO B: DIBUJOS/PLANOS MECÁNICOS ELECTRÓNICOS

B.1. Planos de despiece, ensamble y subensamble



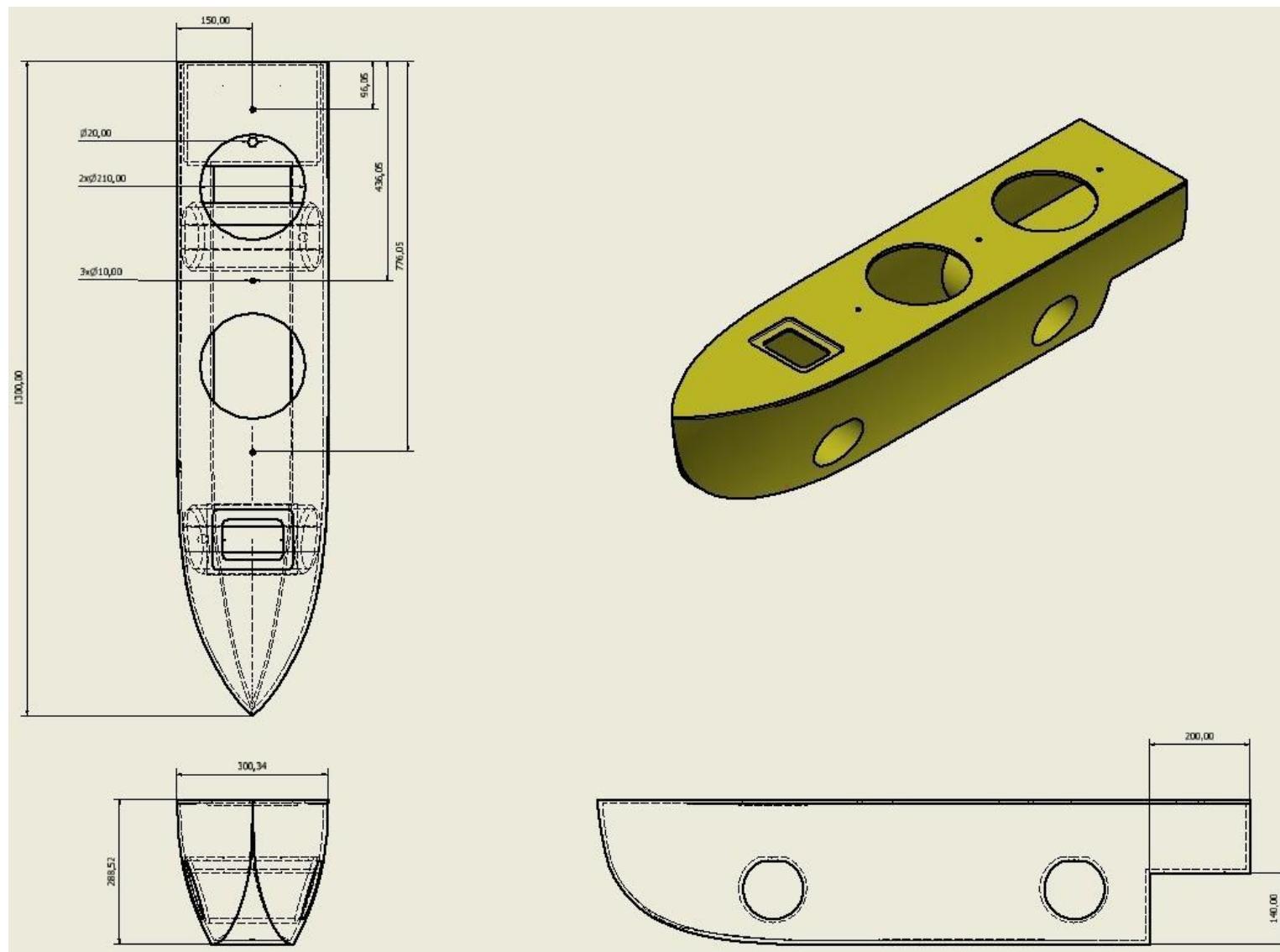


Figura B.3.: Plano de ensamble de un casco del USV auxiliar. Fuente: Propia

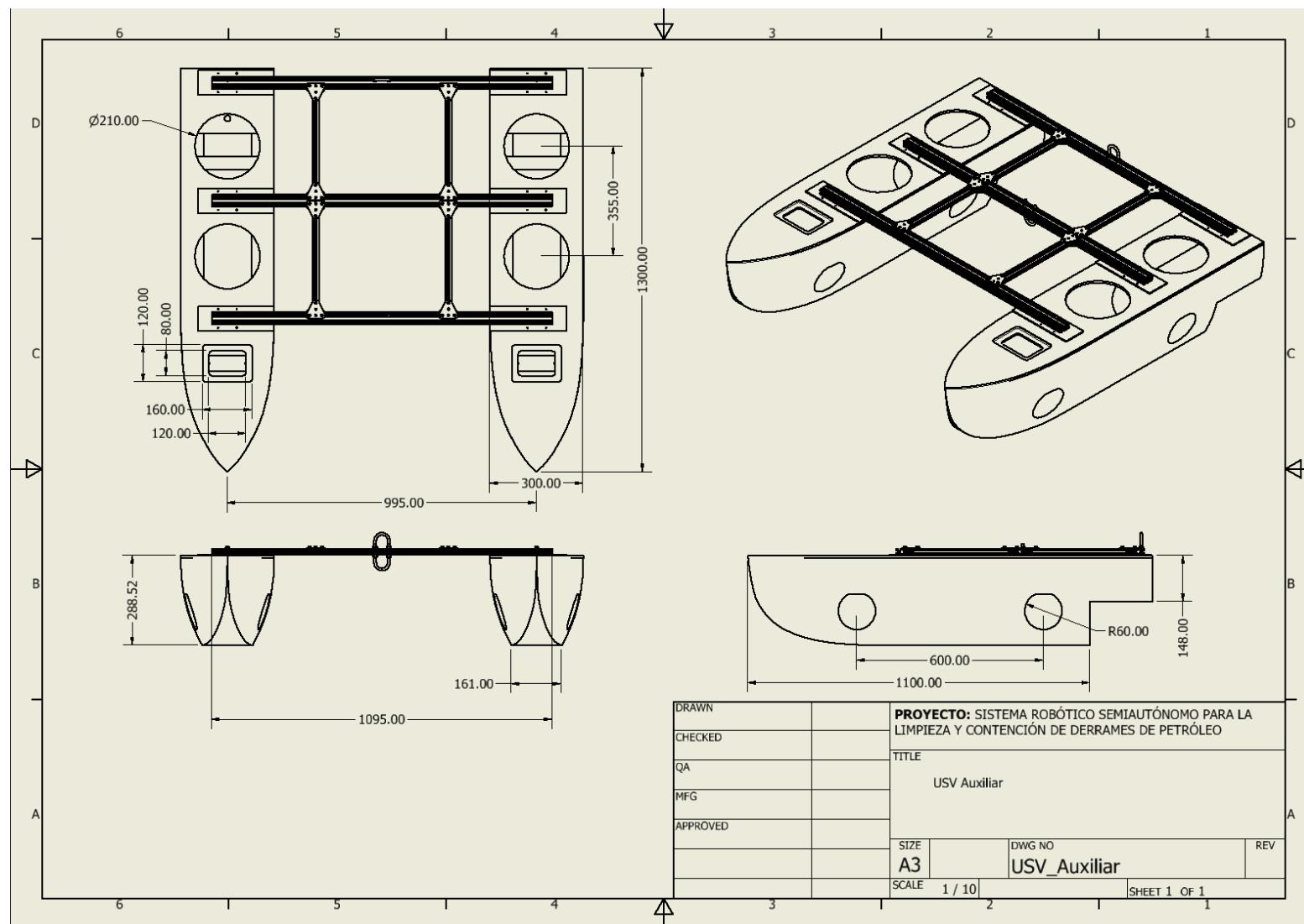


Figura B.4: Plano de ensamble del USV auxiliar. Fuente: Propia

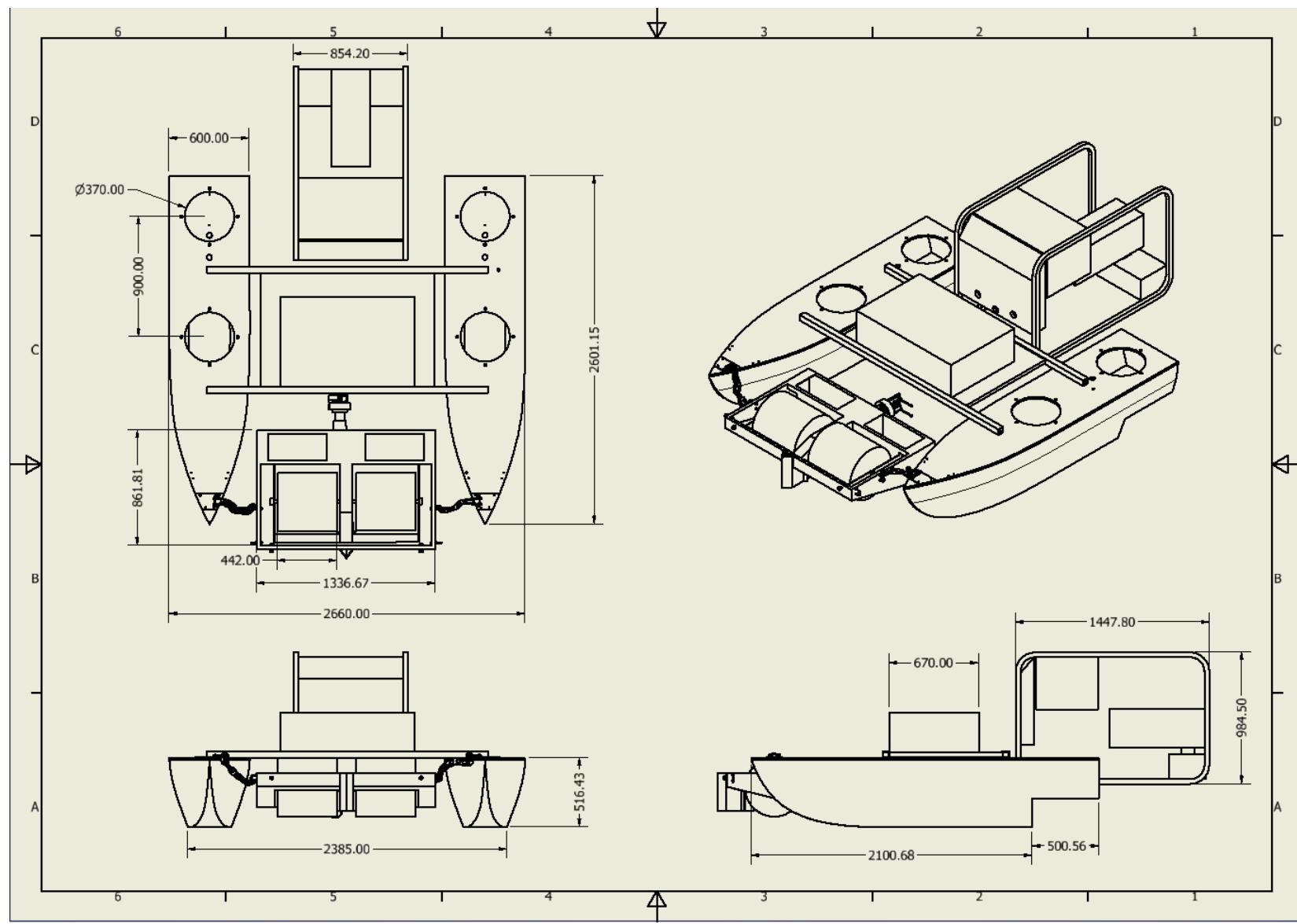


Figura B.5: Plano de ensamble del USV principal. Fuente: Propia

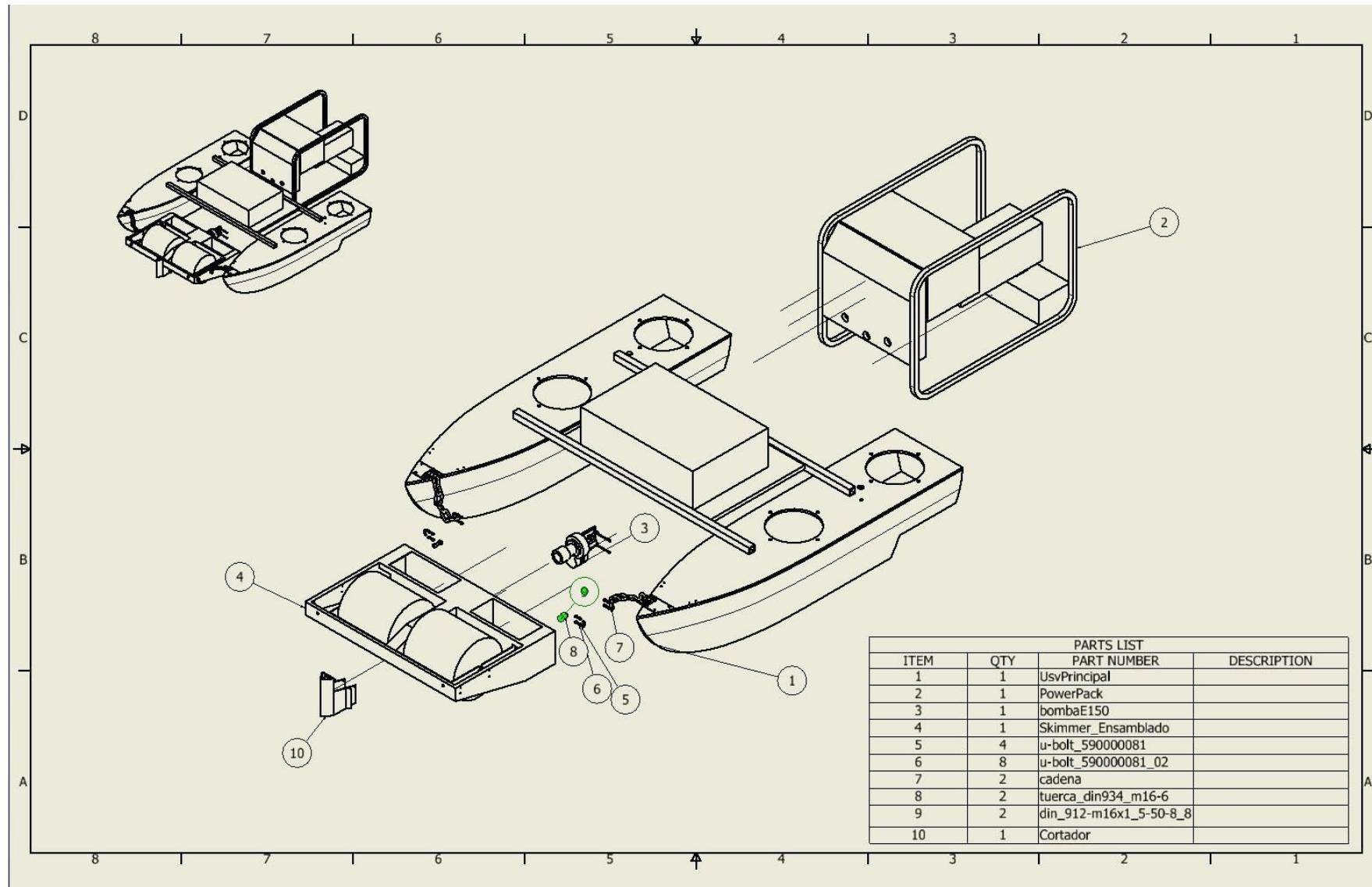


Figura B.6: Vista explosionada del USV principal. Fuente: Propia

B.2. Planos de esquemas eléctricos, electrónicos y de control

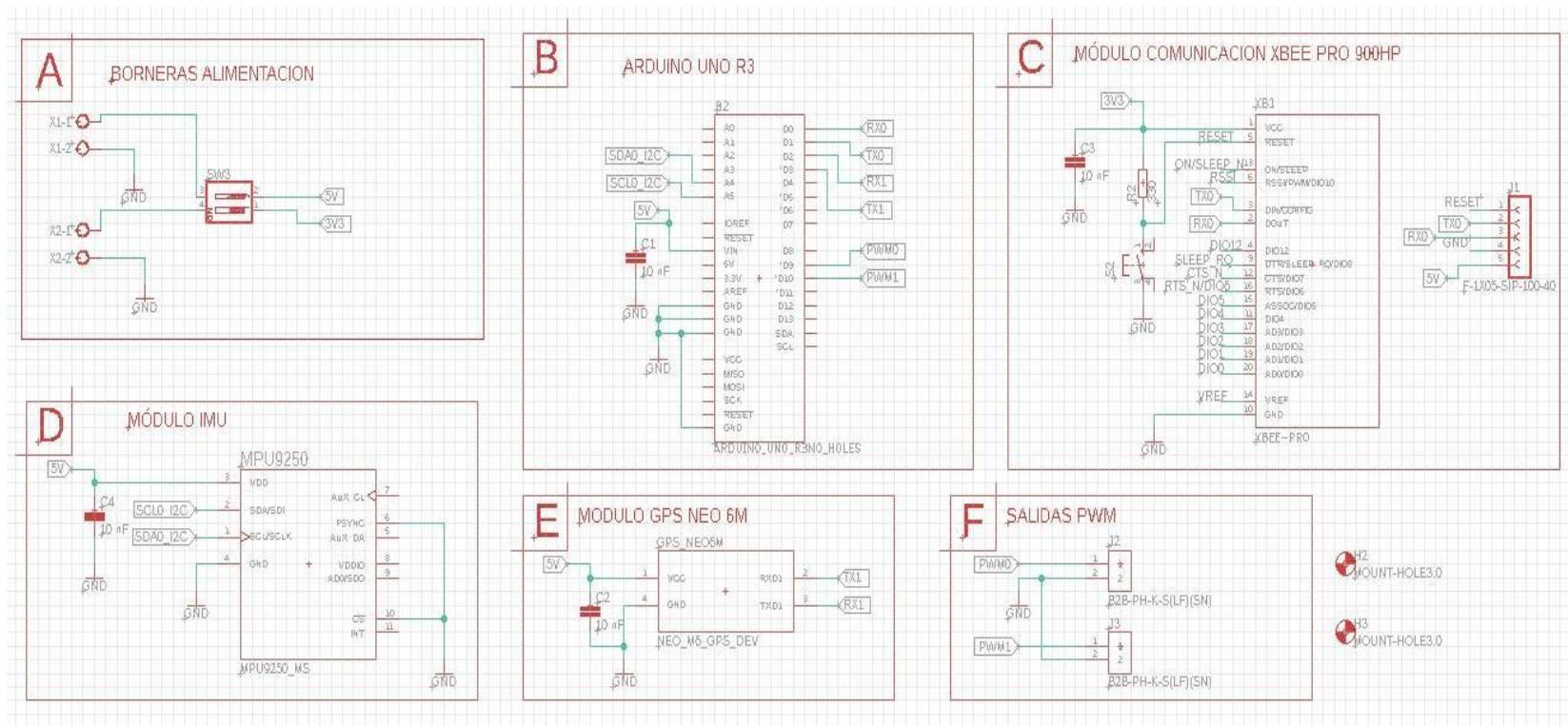


Figura B.5. Esquemático de la tarjeta de alimentación.

Fuente: Propia.

Para la conexión de las baterías a la tarjeta se usan unas borneras de 2 pines, estas pueden soportar hasta 45 A, que es la máxima corriente que va a entregar la tarjeta de alimentación para los propulsores.

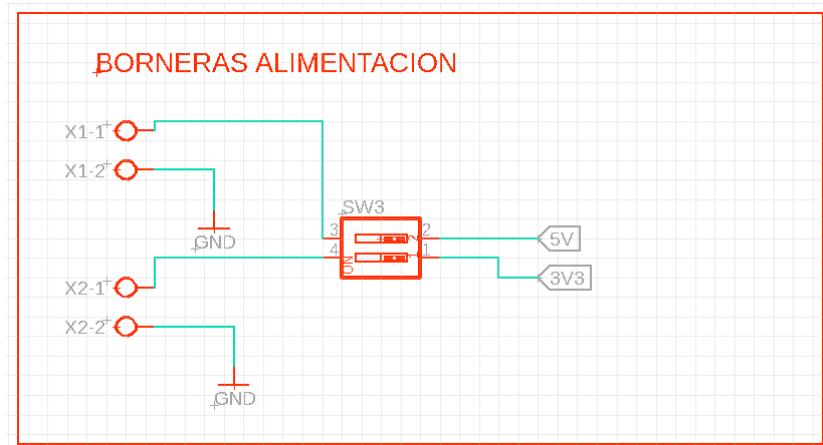


Figura B.6. Esquemático de la tarjeta de alimentación.

Fuente: Propia.

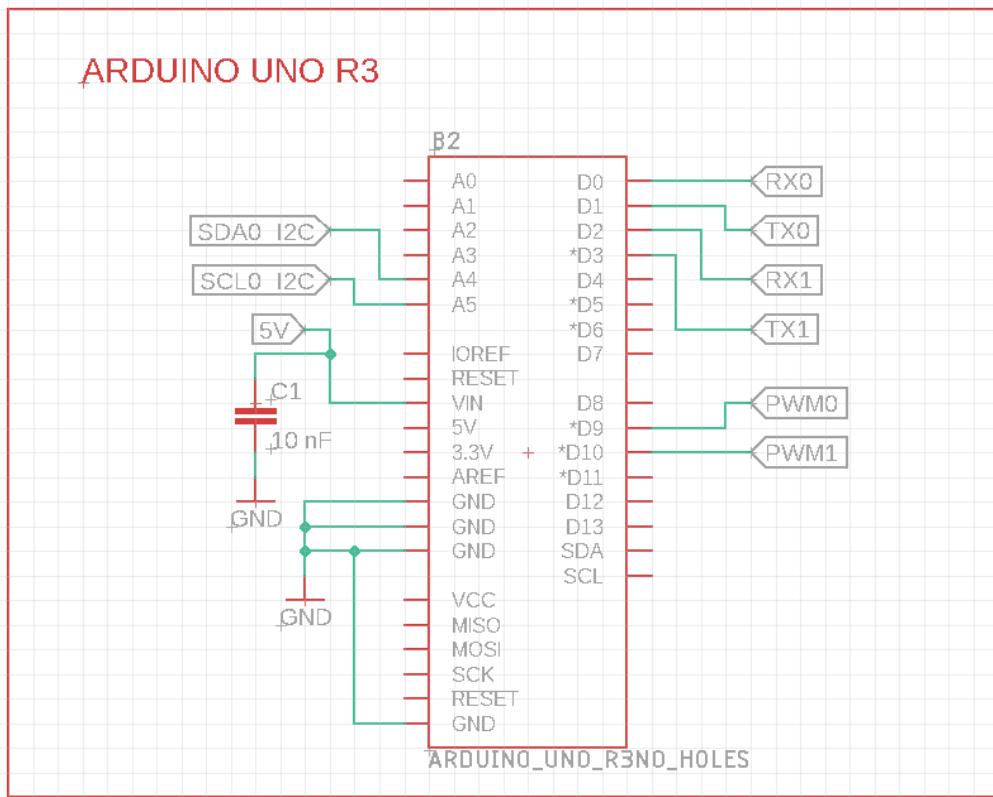


Figura B.7. Esquemático de la tarjeta de alimentación.

Fuente: Propia.

MÓDULO COMUNICACION XBEE PRO 900HP

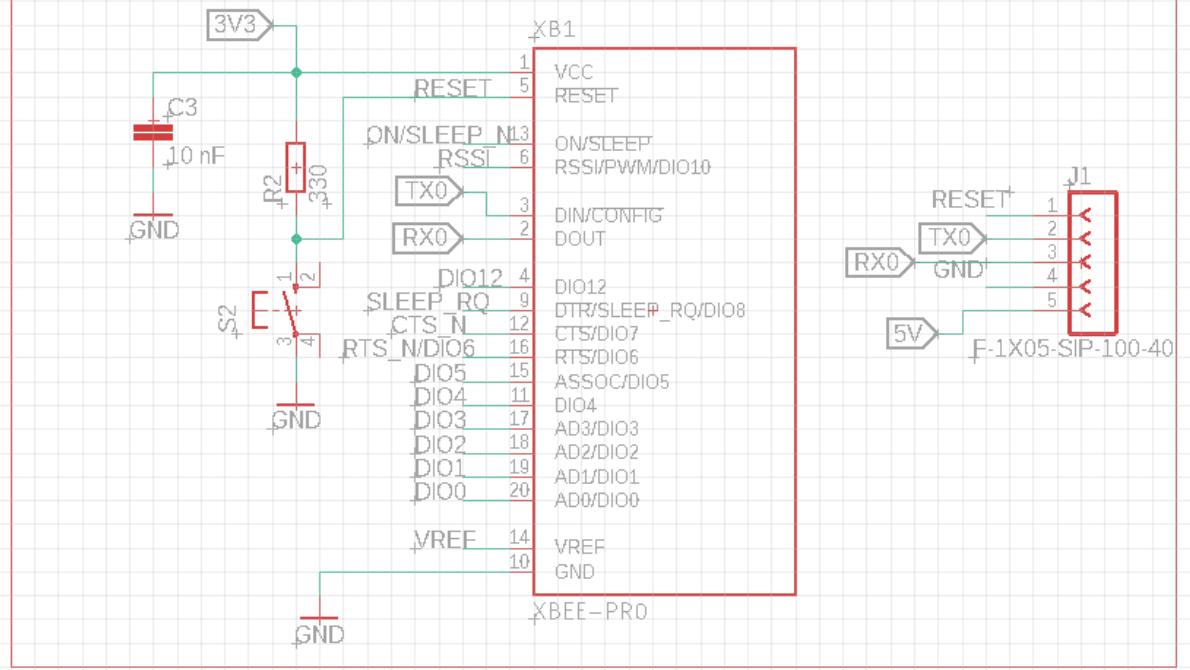


Figura B.8. Esquemático de la tarjeta electrónica.

Fuente: Propia.

MÓDULO IMU

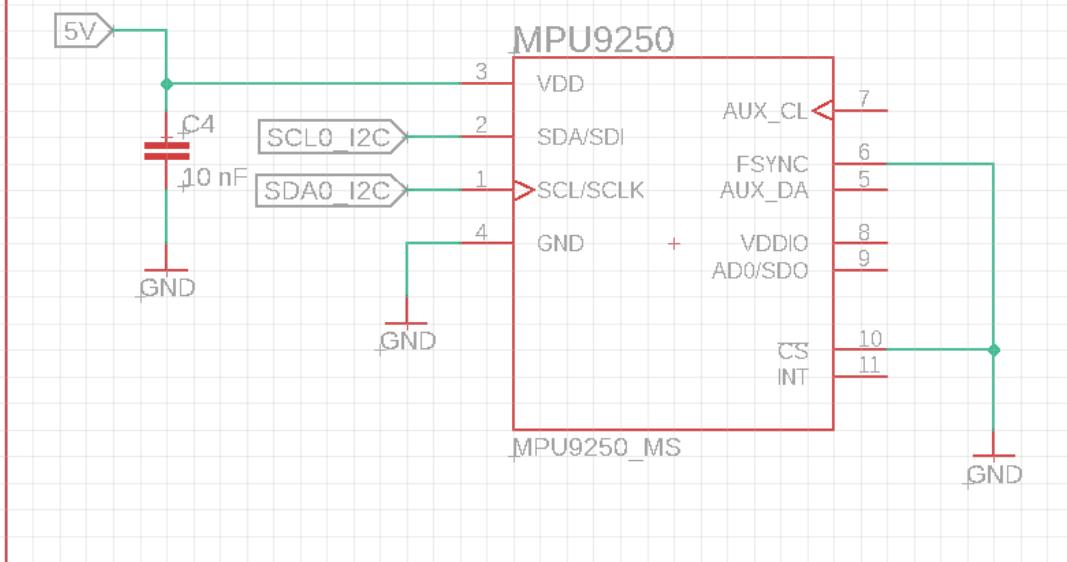


Figura B.9. Esquemático de la tarjeta de alimentación.

Fuente: Propia.

MODULO GPS NEO 6M

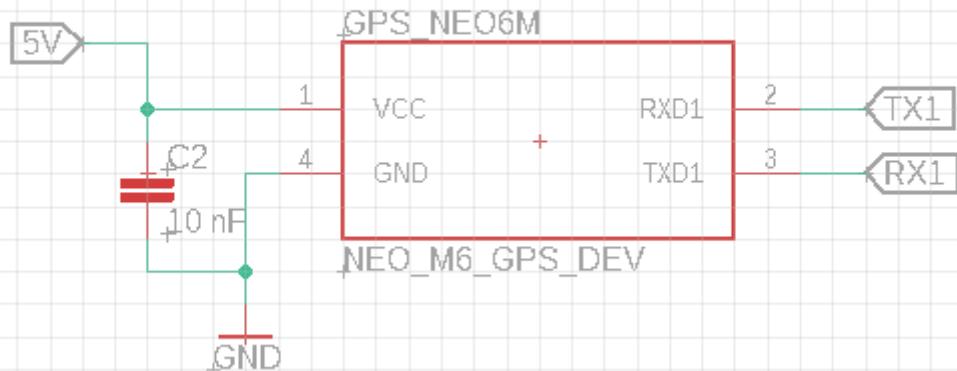


Figura B.10. Esquemático de la tarjeta de alimentación.

Fuente: Propia.

SALIDAS PWM

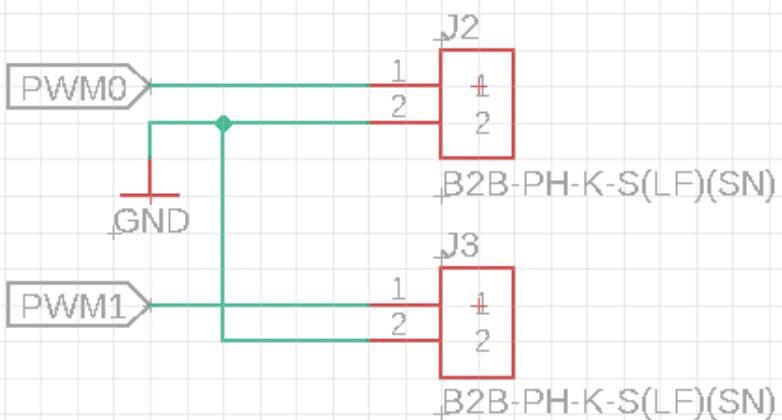


Figura B.11. Esquemático de la tarjeta de alimentación.

Fuente: Propia.

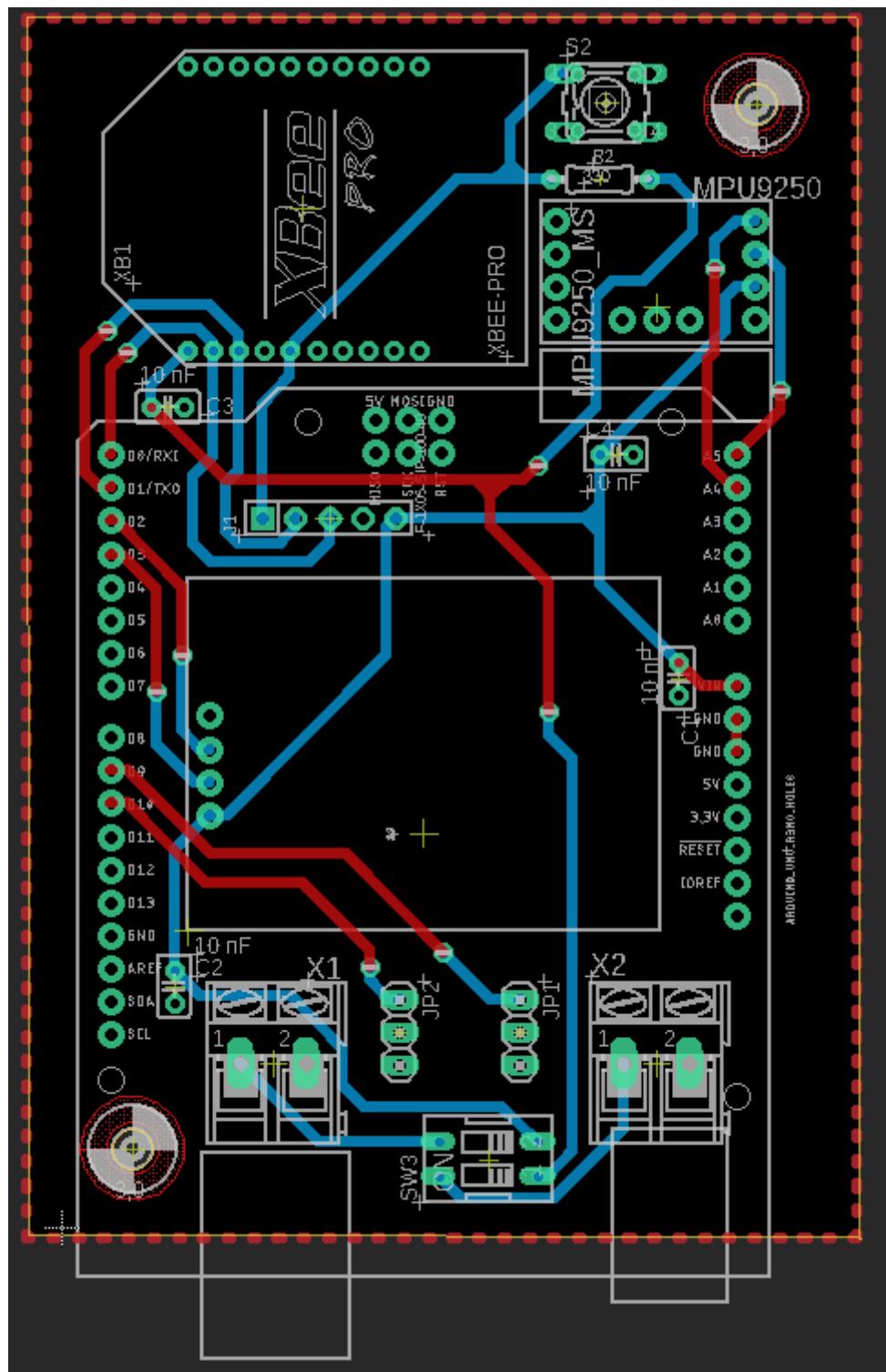


Figura B.12: Board en Eagle de la Tarjeta implementada
Fuente: Propia

DIAGRAMAS DE CIRCUITO HIDRÁULICO

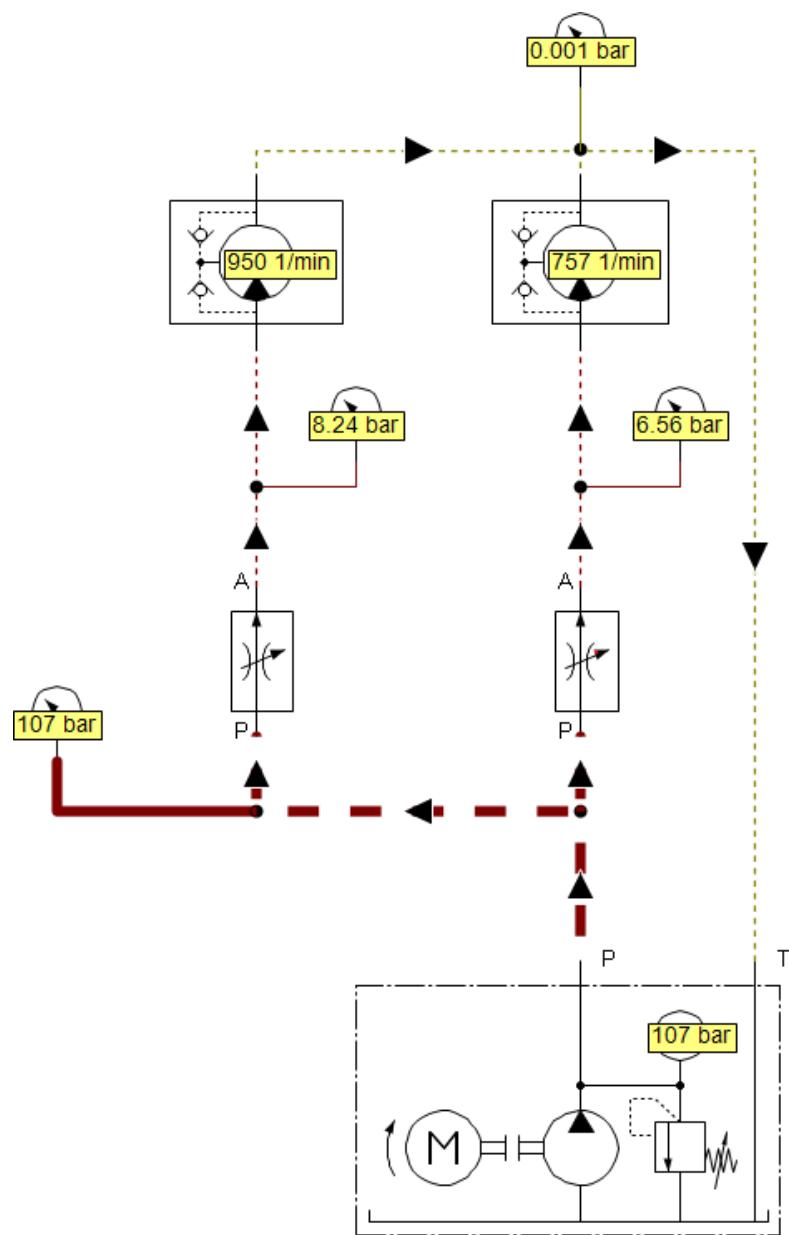
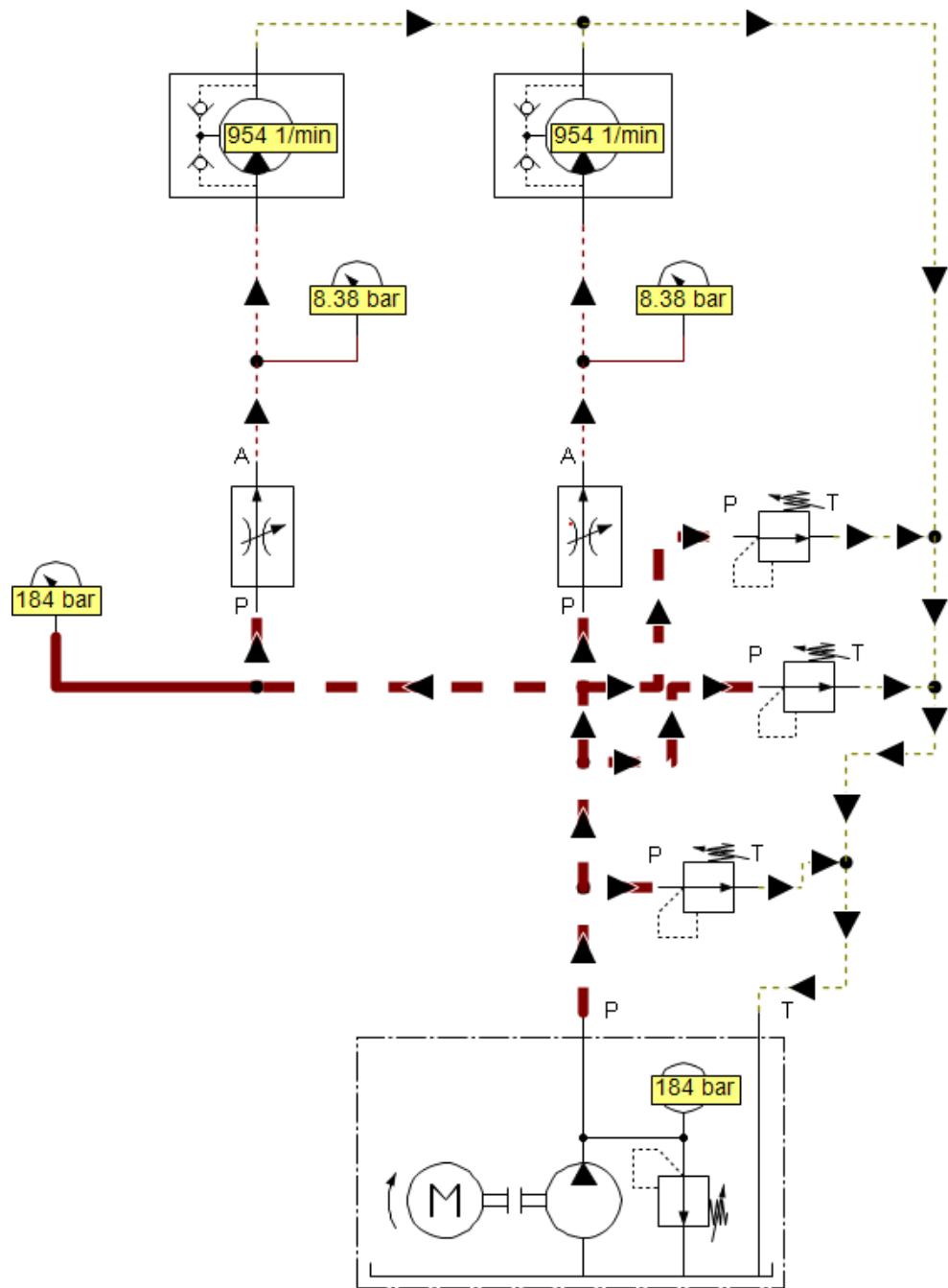


Figura B13. Circuito Hidráulico del PowerPack D10
Fuente: Propia



*Figura B14. Circuito Hidráulico del PowerPack D10 con 3 limitadores de presión
Fuente: Propia*

B.3. Programas de operación documentados

Control del USV AUXILIAR

```
//Control del USV AUXILIAR
```

```

//Incluimos las librerías necesarias
#include <Servo.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <MPU9250_asukiaaa.h>

#include
<Adafruit_BMP280.h>
#include <TinyGPS.h>
#include "DifferentialSteering.h"

//Definimos variables y pines
byte servoPin1 = 9;
byte servoPin2 = 10;
Servo motor1; //motor Izquierdo
Servo motor2; //motor Derecho

int fPivYLimit = 32; //Pivote
DifferentialSteering DiffSteer;

TinyGPS gps;
SoftwareSerial ss(2, 3); //tx rx

#ifndef _ESP32_HAL_I2C_H_
#define SDA_PIN 21
#define SCL_PIN
22 #endif

MPU9250_asukiaaa mySensor;
float aX, aY, aZ, aSqrt, gX, gY, gZ, mDirection, mX, mY, mZ;

void setup() {
Serial.begin(9600);
motor1.attach(servoPin1);
motor1.writeMicroseconds(1500);
motor2.attach(servoPin2);
motor2.writeMicroseconds(1500);
delay(1000); // el retardo permite al ESC reconocer la señal de 1500
DiffSteer.begin(fPivYLimit);

ss.begin(9600);

while(!Serial);
Serial.println("started");

#ifndef _ESP32_HAL_I2C_H_ // For ESP32
Wire.begin(SDA_PIN, SCL_PIN);
mySensor.setWire(&Wire);
#endif

mySensor.beginAccel()
;
mySensor.beginGyro();
mySensor.beginMag();

}

void loop() {

```

```
while (Serial.available() == 0); //Espera a recibir información en el puerto serial  
String serie = Serial.readStringUntil('\n'); //Leer hasta que haya un cambio de linea
```

```

Serial.print("I received: ");
Serial.println(serie);
int canal1 = getValue(serie,'/0).toInt(); //recibido del canal1 - Direccion vertical
int canal2 = getValue(serie,'/1).toInt(); //recibido del canal2 - Direccion
horizontal Serial.print("CH1: ");Serial.print(canal1);Serial.print('\t');
Serial.print("CH2: ");Serial.println(canal2);
//int canal3 = getValue(serie,'/3).toInt(); //recibido del canal3
//int canal4 = getValue(serie,'/4).toInt(); //recibido del canal4

//Diferencial
//Definimos
parametros int XValue
= canal1;
int YValue = canal2;
int lowLimit = 1100;
int highLimit =
1900;

if (((XValue > lowLimit) && (XValue < highLimit) && (YValue > lowLimit) && (YValue < highLimit)))
{
    DiffSteer.computeMotors(XValue, YValue);

    //Al emplear el algoritmo de diferencial se obtiene el valor para cada motor
    int leftMotor = DiffSteer.computedLeftMotor();
    int rightMotor = DiffSteer.computedRightMotor();

    Serial.println("Differential | " + DiffSteer.toString());
    motor1.writeMicroseconds(leftMotor);
    motor2.writeMicroseconds(rightMotor);
} else
{
    Serial.println("valores incorrectos");
}
//delay(200);

uint8_t sensorId;
int result;

result = mySensor.readId(&sensorId);
if (result == 0) {
    Serial.println("sensorId: " + String(sensorId));
} else {
    Serial.println("Cannot read sensorId " + String(result));
}

result
mySensor.accelUpdate();
if
(result == 0) {
    aX
        =
    mySensor.accelX(); aY
    =
    mySensor.accelY(); aZ
    =
    mySensor.accelZ();
    aSqrt = mySensor.accelSqrt();
    Serial.println("accelX: " + String(aX));
    Serial.println("accelY: " + String(aY));
    //Serial.println("accelZ: " + String(aZ));
    Serial.println("accelSqrt: " + String(aSqrt));
} else {
    Serial.println("Cannod read accel values " + String(result));
}

```

```
}

result = mySensor.gyroUpdate();
if (result == 0) {
```

```

gX          =
mySensor.gyroX(); gY
= mySensor.gyroY(); gZ
= mySensor.gyroZ();
Serial.println("gyro:      "      +
String(gX)); Serial.println("gyroY: " +
String(gY)); Serial.println("gyroZ: " +
String(gZ));
} else {
Serial.println("Cannot read gyro values " + String(result));
}

result          =
mySensor.magUpdate();      if
(result == 0) {
mX          =
mySensor.magX(); mY
= mySensor.magY(); mZ
= mySensor.magZ();
mDirection = mySensor.magHorizDirection();
Serial.println("magX: " + String(mX));
Serial.println("maxY: " + String(mY));
Serial.println("magZ: " + String(mZ));
Serial.println("horizontal direction: " +
String(mDirection));
} else {
Serial.println("Cannot read mag values " + String(result));
}

Serial.println("at " + String(millis()) + "ms");
Serial.println(""); // Add an empty line

bool newData =
false; unsigned long
chars;
unsigned short sentences, failed;

// For one second we parse GPS data and report some key values
for (unsigned long start = millis(); millis() - start < 1000;) {
{
while (ss.available())
{
char c = ss.read();
// Serial.write(c); // uncomment this line if you want to see the GPS data flowing
if (gps.encode(c)) // Did a new valid sentence come in?
newData = true;
}
}

if (newData)
{
float flat, flon;
unsigned long
age;
gps.f_get_position(&flat, &flon, &age);
Serial.print("LAT=");
Serial.print(flat == TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE ? 0.0 : flat, 6);
}
}

```

```
Serial.print(" LON=");
Serial.print(flon == TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE ? 0.0 : flon, 6);
Serial.print(" SAT=");
Serial.print(gps.satellites() == TinyGPS::GPS_INVALID_SATELLITES ? 0 : gps.satellites());
Serial.print(" PREC=");
Serial.print(gps.hdop() == TinyGPS::GPS_INVALID_HDOP ? 0 : gps.hdop());
}
```

```

gps.stats(&chars, &sentences, &failed);
Serial.print(" CHARS=");
Serial.print(chars);
Serial.print(" SENTENCES=");
Serial.print(sentences);
Serial.print(" CSUM ERR=");
Serial.println(failed);
if (chars == 0)
    Serial.println("** No characters received from GPS: check wiring **");
delay(200);

}

//Funcion que separa cadenas de texto debido a un separador
String getValue(String data, char separator, int index)
{
    int found = 0;
    int strIndex[] = {0, -1};
    int maxIndex = data.length()-1;

    for(int i=0; i<=maxIndex && found<=index; i++){
        if(data.charAt(i)==separator || i==maxIndex){
            found++;
            strIndex[0] = strIndex[1]+1;
            strIndex[1] = (i == maxIndex) ? i+1 :
            i;
        }
    }
    return found>index ? data.substring(strIndex[0], strIndex[1]) : "";
}

```

Control del USV PRINCIPAL

```

//Control del USV PRINCIPAL

#include <EnableInterrupt.h>
#include <Servo.h>

#define SERIAL_PORT_SPEED 9600
#define RC_NUM_CHANNELS 4
#define RC_CH1 0
#define RC_CH2 1
#define RC_CH3 2
#define RC_CH4 3

#define RC_CH1_INPUT A0
#define RC_CH2_INPUT A1
#define RC_CH3_INPUT A2
#define RC_CH4_INPUT A3

uint16_t rc_values[RC_NUM_CHANNELS];
uint32_t rc_start[RC_NUM_CHANNELS];
volatile uint16_t rc_shared[RC_NUM_CHANNELS];

void rc_read_values() {
    noInterrupts();
    memcpy(rc_values, (const void *)rc_shared, sizeof(rc_shared));
    interrupts();
}

```

```

}

void calc_input(uint8_t channel, uint8_t input_pin) {
    if (digitalRead(input_pin) == HIGH) {
        rc_start[channel] = micros();
    } else {
        uint16_t rc_compare = (uint16_t)(micros() - rc_start[channel]);
        rc_shared[channel] = rc_compare;
    }
}

void calc_ch1() { calc_input(RC_CH1, RC_CH1_INPUT);
} void calc_ch2() { calc_input(RC_CH2, RC_CH2_INPUT); } void calc_ch3() { calc_input(RC_CH3, RC_CH3_INPUT); } void calc_ch4()
{ calc_input(RC_CH4, RC_CH4_INPUT); }

void setup() {
    Serial.begin(SERIAL_PORT_SPEED);
    //Serial1.begin(9600);
    pinMode(RC_CH1_INPUT, INPUT);
    pinMode(RC_CH2_INPUT, INPUT);
    pinMode(RC_CH3_INPUT, INPUT);
    pinMode(RC_CH4_INPUT, INPUT);

    enableInterrupt(RC_CH1_INPUT, calc_ch1, CHANGE);
    enableInterrupt(RC_CH2_INPUT, calc_ch2, CHANGE);
    enableInterrupt(RC_CH3_INPUT, calc_ch3, CHANGE);
    enableInterrupt(RC_CH4_INPUT, calc_ch4, CHANGE);
}

void loop() {
    rc_read_values();
    ;

    // Lectura de cada canal
    rc_values[RC_CH1]=map(rc_values[RC_CH1],1050,1988,1100,1900);
    rc_values[RC_CH2]=map(rc_values[RC_CH2],1000,1988,1900,1100);
    rc_values[RC_CH3]=map(rc_values[RC_CH3],900,2150,1900,1100);
    rc_values[RC_CH4]=map(rc_values[RC_CH4],900,2150,1900,1100);

    // Procesar señales de cada canal

    // Canal 1, movimiento horizontal
    if( rc_values[RC_CH1]>=1450 && rc_values[RC_CH1]<=1550){ rc_values[RC_CH1]=1500; }

    // Canal 2, movimiento vertical
    if( rc_values[RC_CH2]>=1450 && rc_values[RC_CH2]<=1550){ rc_values[RC_CH2]=1500; }

    // Canal 3, control de la bomba
    if( rc_values[RC_CH3]>=1400 && rc_values[RC_CH3]<=1600){ rc_values[RC_CH3]=2; }
    else if(rc_values[RC_CH3]>=1100 && rc_values[RC_CH3]<=1400){ rc_values[RC_CH3]=1; }
    else if(rc_values[RC_CH3]>=1600 && rc_values[RC_CH3]<=1900){
        rc_values[RC_CH3]=3; }

    // Canal 4, control del motor del skimmer
    if( rc_values[RC_CH4]>=1400 && rc_values[RC_CH4]<=1600){ rc_values[RC_CH4]=2; }
}

```

```
else if(rc_values[RC_CH4]>=1100 && rc_values[RC_CH4]<=1400){ rc_values[RC_CH4]=1;}  
else if(rc_values[RC_CH4]>=1600 && rc_values[RC_CH4]<=1900){  
rc_values[RC_CH4]=3;}
```

```
//Envio de señales a través del Xbee
```

```

Serial.print(rc_values[RC_CH1]);
Serial.print("/");
Serial.print(rc_values[RC_CH2]);
Serial.print("/");
Serial.print(rc_values[RC_CH3]);
Serial.print("/");
Serial.println(rc_values[RC_CH4]);

delay(1000);
}

```

Control del Formación y Seguimiento de trayectoria

```

clc
clear
clos
e all

%%%
1)Tiempo
ts=0.01;
t=0:ts:80;

%%% ^~~ referencias
% es R=
% % 15 Trayectoria deseada
% |
% xad = 0 +
% R*cos(V*t/R); yad =
% 0 + R*sin(V*t/R);
% xadp =
% -V*sin(V*t/R); yadp
% = V*cos(V*t/R);
% xadpp
% = -V^2/R*cos(V*t/R);
% yadpp
% = -V^2/R*sin(V*t/R);

% Trayectoria recta
% xad = t;
% yad = t;
% xadp = 0*t+1;
% yadp = 0*t+1;
% xadpp = 0*t;
% yadpp = 0*t;
% p1=[0 -2 pi/2];
% p2=[-2 -1 pi/2];
% p3=[2 -1 pi/2];

% Trayectoria especial
% xad = (12*sin(0.1*t)-4*sin(3*0.1*t))/1;
% yad =
(13*cos(0.1*t)-5*cos(2*0.1*t)-2*cos(3*0.1*t)-cos(4*0.1*t))/1;
% xadp = diff([0 xad]);
% yadp = diff([0 yad]);
% xadpp = diff([0 xadp]);
% yadpp = diff([0 yadp]);
% p1=[0 3 pi/2];
% p2=[-2 4 pi/2];
% p3=[2 4 pi/2];

% Trayectoria
% xad = 4

```

```

yad = 5*sin(0.1*t);
xadp= diff([0 xad]); %Posicion x
yadp= diff([0 yad]); %Posicion y
xadpp = diff([0 xadp]);
yadpp = diff([0
yadp]); p1=[0 0 pi/2];
p2=[-2 2 pi/2];
p3=[2 -2 pi/2];

% Longitud y angulo deseado 1-2
l12d = 9;
alfa12d = pi/6;

% Longitud y angulo deseado 1-3
l13d = 9;
alfa13d = -pi/6;

%% 3)Condiciones iniciales
%Constante
s d=1;
L=1;
m11=200
;
m22=250
;
Izz=700;
d11=70;
d22=100;
d66=50;
m=300;
d55=500;
GF=0.5;
Ix=300;
rho=1000
;
Iyy=700;
m33=100;
MTp=0.5;
g=9.81;
m66=80;
d44=500;
MTq=0.5;
Awp=1;
d33=100;

lambda1=3; %Ganancias del seguidor
lambda2=3;

lambdaf1=5; %Ganancias del controlador l alfa
lambdaf2=8;
n=0.05;
a1=1000
;
a2=1000
;
df=1;
%k1=5;
%k2=8;

%Variables
%%%%% USV1

```

```
x1(1)=p1(1);  
y1(1)=p1(2);  
psi1(1)=p1(3);
```

```

u1(1)=1;
v1(1)=0;
r1(1)=0;
xa1(1)=x1(1)+d*cos(psi1(1));
ya1(1)=y1(1)+d*sin(psi1(1));
xap1(1)=u1(1)*cos(psi1(1))-(v1(1)+r1(1)*d)*sin(psi1(1));
yap1(1)=u1(1)*sin(psi1(1))+(v1(1)+r1(1)*d)*cos(psi1(1));

psip1(1)=r1(1);
xp1(1)=u1(1)*cos(psi1(1))-v1(1)*sin(psi1(1));
yp1(1)=u1(1)*sin(psi1(1))+v1(1)*cos(psi1(1));

xc=0
;
yc=0
;
%%%%%
USV2
x2(1)=p2(1);
y2(1)=p2(2);
psi2(1)=p2(3);
u2(1)=1.5;
v2(1)=0;
r2(1)=0;
psip2(1)=r2(1);
xp2(1)=u2(1)*cos(psi2(1))-v2(1)*sin(psi2(1));
yp2(1)=u2(1)*sin(psi2(1))+v2(1)*cos(psi2(1));

xa2(1)=x2(1)+d*cos(psi2(1));
ya2(1)=y2(1)+d*sin(psi2(1));
xap2(1)=u2(1)*cos(psi2(1))-(v2(1)+r2(1)*d)*sin(psi2(1));
yap2(1)=u2(1)*sin(psi2(1))+(v2(1)+r2(1)*d)*cos(psi2(1));

%%%%%
USV3
x3(1)=p3(1);
y3(1)=p3(2);
psi3(1)=p3(3);
u3(1)=1.5;
v3(1)=0;
r3(1)=0;
psip3(1)=r3(1);
xp3(1)=u3(1)*cos(psi3(1))-v3(1)*sin(psi3(1));
yp3(1)=u3(1)*sin(psi3(1))+v3(1)*cos(psi3(1));

xa3(1)=x3(1)+d*cos(psi3(1));
ya3(1)=y3(1)+d*sin(psi3(1));
xap3(1)=u3(1)*cos(psi3(1))-(v3(1)+r3(1)*d)*sin(psi3(1));
yap3(1)=u3(1)*sin(psi3(1))+(v3(1)+r3(1)*d)*cos(psi3(1));

%% 4) Control
for
k=1:length(t)

%a) Errores de control
zn = [xa1(k)-xad(k);ya1(k)-yad(k)];
znp = [xap1(k)-xadp(k);yap1(k)-yadp(k)];
zdpp = [xadpp(k);yadpp(k)];
gains = [lambda1 0,0 lambda2];

```

%b) Matriz bb

```

bb=[cos(psi1(k))/m11, -d*sin(psi1(k))/Izz; sin(psi1(k))/m11, d*cos(psi1(k))/Izz];

%c) Matriz ff

ffx1=(m22*v1(k)*r1(k)-d11*u1(k))*cos(psi1(k))/m11-u1(k)*r1(k)*sin(psi1(k))+(m11*u1(k)*r1(k)+d22*v1(k)
))*sin(psi1(k))/m22 ...
-d*sin(psi1(k))/Izz*((m11-m22)*u1(k)*v1(k)-d66*r1(k)-(v1(k)+r1(k)*d)*r1(k)*cos(psi1(k));
ffy1=(m22*v1(k)*r1(k)-d11*u1(k))*sin(psi1(k))/m11+u1(k)*r1(k)*sin(psi1(k))-(m11*u1(k)*r1(k)+d22*v1(k
))*cos(psi1(k))/m22 ...
+d*cos(psi1(k))/Izz*((m11-m22)*u1(k)*v1(k)-d66*r1(k)-(v1(k)+r1(k)*d)*r1(k)*sin(psi1(k));
ff=[ffx1;ffy1];

%d) Ley de control uu
uuu = inv(bb)*(zdpp-2*gains*znp-(gains^2*zn)-ff);
F1(k)=uuu(1);
T1(k)=uuu(2);

f2_1(k)=(F1(k)+2*T1(k))/2;
f1_1(k)=F1(k)-f2_1(k);
% 5) Aplicar acciones de control al robot

fx=(m11/m22)*d22*v1(k)*sin(psi1(k))-d11*u1(k)*cos(psi1(k))+psip1(k)*(v1(k)*cos(psi1(k))-(m11/m22)*u
1(k)*sin(psi1(k)))*(m22-m11);
fy=-(m11/m22)*d22*v1(k)*cos(psi1(k))-d11*u1(k)*sin(psi1(k))+psip1(k)*(v1(k)*sin(psi1(k))+(m11/m22)*
u1(k)*cos(psi1(k)))*(m22-m11);
fpsi=-(m22-m11)*u1(k)*v1(k)-d33*psip1(k);

xpp1(k)=(1/m11)*(fx+F1(k)*cos(psi1(k)));
ypp1(k)=(1/m22)*(fy+F1(k)*sin(psi1(k)));
psipp1(k)=(1/Izz)*(fpsi+T1(k));

xp1(k+1)=xp1(k)+ts*xpp1(k);
yp1(k+1)=yp1(k)+ts*ypp1(k);
psip1(k+1)=psip1(k)+ts*psipp1(k);

% Hallar posiciones
x1(k+1)=x1(k)+ts*xp1(k);
y1(k+1)=y1(k)+ts*yp1(k);
psi1(k+1)=psi1(k)+ts*psip1(k);
%u1(k+1)=u1(k)+ts*up1(k);
%v1(k+1)=v1(k)+ts*vp1(k);
%r1(k+1)=r1(k)+ts*rp1(k);

u1(k+1)=xp1(k+1)*cos(psi1(k+1))+yp1(k+1)*sin(psi1(k+1));
v1(k+1)=-xp1(k+1)*sin(psi1(k+1))+yp1(k+1)*cos(psi1(k+1))
;r1(k+1)=psip1(k+1);

xap1(k+1)=xp1(k+1)-d*psip1(k)*sin(psi1(k));
yap1(k+1)=yp1(k+1)+d*psip1(k)*cos(psi1(k));

xa1(k+1)=x1(k+1)+d*cos(psi1(k+1));
ya1(k+1)=y1(k+1)+d*sin(psi1(k+1));
%xap1(k+1)=u1(k+1)*cos(psi1(k+1))-(v1(k+1)+r1(k+1)*d)*sin(psi1(k+1));
%yap1(k+1)=u1(k+1)*sin(psi1(k+1))+(v1(k+1)+r1(k+1)*d)*cos(psi1(k+1));
%xa1(k+1)=xa1(k)+ts*xap1(k);

```

```

%ya1(k+1)=ya1(k)+ts*yap1(k);

%%%%%% Control formacion 1-2
%%%%%%%
% l12(k)=(((xa2(k)-x1(k))^2)+((ya2(k)-y1(k))^2))^(0.5;

dx1=xa1(k)-x1(k);
dpx1=xap1(k)-xp1(k)
; dx2=xa2(k)-x1(k);
dpx2=xap2(k)-xp1(k)
; dy1=ya1(k)-y1(k);
dpy1=yap1(k)-yp1(k)
; dy2=ya2(k)-y1(k);
dpy2=yap2(k)-yp1(k)
;

nu=dx1*dx2+dy1*dy2;
num=(nu);
de1=sqrt(dx1^2+dy1^2);
de2=sqrt(dx2^2+dy2^2);
den=(de1*de2);
factor=num/den;
alfa12(k)=acos(factor);

nump=(dpx1*dx2+dpx2*dx1+dpy1*dy2+dpy1*dpy2);
denp=(dx1*dpx1+dy1*dpy1)*de2/de1+de1*(dx2*dpx2+dy2*dpy2)/de2;
%alfa12(k)=pi-psi1(k)-acos((x1(k)-xa2(k))/l12(k))
; gamma1(k)=psi1(k)+alfa12(k)-psi2(k);

lp12(k)=((ya2(k)-y1(k))*(yap2(k)-yp1(k))+(xa2(k)-x1(k))*(xap2(k)-xp1(k)))/(((ya2(k)-y1(k))^2+(xa2(k)-x1(k))^2)^0.5);

%alfap12(k)=-psip1(k)+((xp1(k)-xap2(k))*l12(k)-(x1(k)-xa2(k))*lp12(k))/(l12(k)^2*(1-((x1(k)-xa2(k))/l12(k))^2)^0.5);
alfap12(k)=((nump*den-num*denp)/(den^2))/(-sqrt(1-factor^2));
%a) Errores de control
zfn1 = l12(k)-l12d;
zfn2 = alfa12(k)-alfa12d;
zfn = [zfn1;zfn2];
zfnp = [lp12(k)-0;alfap12(k)-0];
zfdpp = [0,0];

%Ganancias
k1=n*lambdaf1+(1-n)*(lambdaf1^2)/(lambdaf1+a1*zfn1^2)
;
k2=n*lambdaf2+(1-n)*(lambdaf2^2)/(lambdaf1+a2*zfn2^2)
; gainsf = [k1 0;0 k2];

%b) Matriz blalfa
blalfa=[cos(gamma1(k))/m11, df*sin(gamma1(k))/Izz; -sin(gamma1(k))/(m11*l12(k)),
df*cos(gamma1(k))/(Izz*l12(k))];

%c) Matriz
flalfa
mr=m11/m22;
md=m22-m11;

fx2=mr*d22*v2(k)*sin(psi2(k))-d11*u2(k)*cos(psi2(k))+psip2(k)*(v2(k)*cos(psi2(k))-mr*u2(k)*sin(psi2(k))
))*md,

```

```

fy2=-mr*d22*v2(k)*cos(psi2(k))-d11*u2(k)*sin(psi2(k))+psip2(k)*(v2(k)*sin(psi2(k))+mr*u2(k)*cos(psi2(k)))*md;
fpsi2=-md*u2(k)*v2(k)-d33*psip2(k);
alfa0(k)=psi1(k)+alfa12(k);
alfa0p(k)=psip1(k)+alfap12(k);

fl=(1/m11)*(fx2*cos(alfa0(k))+fy2*sin(alfa0(k)))+(1/Izz)*fpsi2*d*sin(gamma1(k))-xpp1(k)*cos(alfa0(k))-y
pp1(k)*sin(alfa0(k))...
-d*psip2(k)^2*cos(gamma1(k))+l12(k)*alfa0p(k)^2;

falfa=(1/m11)*(-fx2*sin(alfa0(k))+fy2*cos(alfa0(k)))+(1/Izz)*fpsi2*d*cos(gamma1(k))-xpp1(k)*sin(alfa0(k))
-ypp1(k)*cos(alfa0(k))...
+d*psip2(k)^2*sin(gamma1(k))-2*lp12(k)*alfa0p(k)-l12(k)*psipp1(k);
flalfa=[fl,falfa/l12(k)];

%d) Ley de control uu2
uu2 = inv(blalfa)*(zfdpp-2*(gainsf^0.5)*zfnp-(gainsf*zfn)-flalfa);
F2(k)=uu2(1);
T2(k)=uu2(2);

f2_2(k)=(F2(k)+2*T2(k))/2;
f1_2(k)=F2(k)-f2_2(k);

% 5) Aplicar acciones de control al robot

xpp2(k)=(1/m11)*(fx2+F2(k)*cos(psi2(k)));
ypp2(k)=(1/m22)*(fy2+F2(k)*sin(psi2(k)));
psipp2(k)=(1/Izz)*(fpsi2+T2(k));

xp2(k+1)=xp2(k)+ts*xpp2(k);
yp2(k+1)=yp2(k)+ts*ypp2(k);
psip2(k+1)=psip2(k)+ts*psipp2(k);

% Hallar posiciones
x2(k+1)=x2(k)+ts*xp2(k);
y2(k+1)=y2(k)+ts*yp2(k);
psi2(k+1)=psi2(k)+ts*psip2(k);

u2(k+1)=xp2(k+1)*cos(psi2(k+1))+yp2(k+1)*sin(psi2(k+1));
v2(k+1)=-xp2(k+1)*sin(psi2(k+1))+yp2(k+1)*cos(psi2(k+1));
; r2(k+1)=psip2(k+1);

xap2(k+1)=xp2(k+1)-d*psip2(k)*sin(psi2(k));
yap2(k+1)=yp2(k+1)+d*psip2(k)*cos(psi2(k));

xa2(k+1)=x2(k+1)+d*cos(psi2(k+1));
ya2(k+1)=y2(k+1)+d*sin(psi2(k+1));

%%%%%% Control formacion 1-3
%%%%%%%
% l13(k)=((xa3(k)-x1(k))^2)+((ya3(k)-y1(k))^2)^0.5;

dx1=xa1(k)-x1(k);
dpx1=xap1(k)-xp1(k)
; dx3=xa3(k)-x1(k);
dpx3=xap3(k)-xp1(k)
; dy1=ya1(k)-y1(k);

```

```

dpy1=yap1(k)-yp1(k)
; dy3=ya3(k)-y1(k);
dpy3=yap3(k)-yp1(k)
;

nu=dx1*dx3+dy1*dy3;
num=(nu);
de1=sqrt(dx1^2+dy1^2)
;
de2=sqrt(dx3^2+dy3^2)
; den=(de1*de2);
factor=num/den;
alfa13(k)=-acos(factor);

nump=(dp1*x3+dx1*dp3+dy1*dy3+dpy1*dpy3);
denp=(dx1*dp1+dy1*dpy1)*de2/de1+de1*(dx3*dp3+dy3*dpy3)/de2;
%alfa12(k)=pi-psi1(k)-acos((x1(k)-xa2(k))/l12(k))
; gamma1_3(k)=psi1(k)+alfa13(k)-psi3(k);

lp13(k)=((ya3(k)-y1(k))*(yap3(k)-yp1(k))+(xa3(k)-x1(k))*(xap3(k)-xp1(k)))/(((ya3(k)-y1(k))^2+(xa3(k)-x1(k))^2)^0.5);

%alfap12(k)=-psip1(k)+((xp1(k)-xap2(k))*l12(k)-(x1(k)-xa2(k))*lp12(k))/(l12(k)^2*(1-((x1(k)-xa2(k))/l12(k))^2)^0.5);
alfap13(k)=-(nump*den-num*denp)/(den^2)/(-sqrt(1-factor^2));

%a) Errores de control
zfn1 = l13(k)-l13d;
zfn2 = alfa13(k)-alfa13d;
zfn = [zfn1;zfn2];
zfnp = [lp13(k)-0;alfap13(k)-0];
zfdpp = [0;0];

%Ganancias
k1=n*lambdaf1+(1-n)*(lambdaf1^2)/(lambdaf1+a1*zfn1^2)
;
k2=n*lambdaf2+(1-n)*(lambdaf2^2)/(lambdaf1+a2*zfn2^2)
; gainsf = [k1 0;0 k2];

%b) Matriz blalfa
blalfa=[cos(gamma1_3(k))/m11, df*sin(gamma1_3(k))/Izz; -sin(gamma1_3(k))/(m11*l13(k)),
df*cos(gamma1_3(k))/(Izz*l13(k))];

%c) Matriz
flalfa
mr=m11/m22;
md=m22-m11;

fx3=mr*d22*v3(k)*sin(psi3(k))-d11*u3(k)*cos(psi3(k))+psip3(k)*(v3(k)*cos(psi3(k))-mr*u3(k)*sin(psi3(k)))
)*md;
fpsi3=-md*u3(k)*v3(k)-d33*psip3(k);
alfa0_3(k)=psi1(k)+alfa13(k);
alfa0p_3(k)=psip1(k)+alfap13(k);

fl=(1/m11)*(fx3*cos(alfa0_3(k))+fy3*sin(alfa0_3(k)))+(1/Izz)*fpsi3*d*sin(gamma1_3(k))-xpp1(k)*cos(alf
a0_3(k))-ypp1(k)*sin(alfa0_3(k))...
-d*psip3(k)^2*cos(gamma1_3(k))+l13(k)*alfa0p_3(k)^2;

```

```

falfa=(1/m11)*(-fx3*sin(alfa0_3(k))+fy3*cos(alfa0_3(k)))+(1/Izz)*fpsi3*d*cos(gamma1_3(k))-xpp1(k)*sin(alfa0_3(k))-ypp1(k)*cos(alfa0_3(k))...
+d*psip3(k)^2*sin(gamma1_3(k))-2*lp13(k)*alfa0p_3(k)-l13(k)*psipp1(k);
flalfa=[fl;falfa/l13(k)];

%d) Ley de control uu2
uu3 = inv(blalfa)*(zfdpp-2*(gainsf^0.5)*zfnp-(gainsf*zfn)-flalfa);
F3(k)=uu3(1);
T3(k)=uu3(2);

f2_3(k)=(F3(k)+2*T3(k))/2;
f1_3(k)=F3(k)-f2_3(k);

% 5) Aplicar acciones de control al robot

xpp3(k)=(1/m11)*(fx3+F3(k)*cos(psi3(k)));
ypp3(k)=(1/m22)*(fy3+F3(k)*sin(psi3(k)));
psipp3(k)=(1/Izz)*(fpsi3+T3(k));

xp3(k+1)=xp3(k)+ts*xpp3(k);
yp3(k+1)=yp3(k)+ts*ypp3(k);
psip3(k+1)=psip3(k)+ts*psipp3(k);

% Hallar posiciones
x3(k+1)=x3(k)+ts*xp3(k);
y3(k+1)=y3(k)+ts*yp3(k);
psi3(k+1)=psi3(k)+ts*psip3(k);

u3(k+1)=xp3(k+1)*cos(psi3(k+1))+yp3(k+1)*sin(psi3(k+1));
v3(k+1)=-xp3(k+1)*sin(psi3(k+1))+yp3(k+1)*cos(psi3(k+1));
;r3(k+1)=psip3(k+1);

xap3(k+1)=xp3(k+1)-d*psip3(k)*sin(psi3(k));
yap3(k+1)=yp3(k+1)+d*psip3(k)*cos(psi3(k));

xa3(k+1)=x3(k+1)+d*cos(psi3(k+1));
ya3(k+1)=y3(k+1)+d*sin(psi3(k+1));

end
%%

%% Simulacion

USVx=[0 0 0 0.45 0.9;1 1 0 0.45 0.9;1.5 1.5 0.1 0.55 1;1 1 0.1 0.55 1;0 0 0 0.45 0.9];
USVy=[0.4 -0.4 0 0 0;0.4 -0.4 0.75 0.75 0.75;0.575 -0.575 0.75 0.75 0.75;0.75 -0.75 -0.75 -0.75 -0.75;0.75 -0.75 -0.75 -0.75];
g =
hgtransform; h
= hgtransform; j
= hgtransform;
C = [1; 1; 0; 0; 0];
patch(USVx,USVy,C,'Parent',g)
;
patch(USVx,USVy,C,'Parent',h)
;
patch(USVx,USVy,C,'Parent',j);
%colorbar
% fig=figure;
axis equal
xlim([-10
90])

```

```
ylim([-30 40])
% set(fig,'position',[50 10 1500 1000]);
```

```

line1=animatedline('Color','r','LineWidth',2,'DisplayName','USV1-Principal')
;
line2=animatedline('Color','b','LineWidth',2,'DisplayName','USV2-Auxiliar');
line3=animatedline('Color','c','LineWidth',2,'DisplayName','USV3-Auxiliar');

lgd=legend('Location','northwest');
lgd.Title.String = 'USV';
for i=1:10:length(t)
    j.Matrix = makehgform('translate',[x1(i),y1(i),0],
        ... 'scale',2,...
        ... 'zrotate',psi1(i));
    g.Matrix = makehgform('translate',[x2(i),y2(i),0],
        ... 'zrotate',psi2(i));
    h.Matrix = makehgform('translate',[x3(i),y3(i),0],
        ... 'zrotate',psi3(i));

    addpoints(line1,xa1(i),ya1(i))
    ;
    addpoints(line2,xa2(i),ya2(i))
    ;
    addpoints(line3,xa3(i),ya3(i))
    ; drawnow
    pause(0.001
) end
hold off
%%%
Graficas
figure
plot(t,F1(1:length(t)))
hold on
plot(t,F2(1:length(t)))
plot(t,F3(1:length(t)))
title("Gráfica de Fuerzas vs tiempo")
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Fuerza
(N)')
hold off
legend({'USV1','USV2','USV3'})
hold off

figure
plot(t,T1(1:length(t)))
hold on
plot(t,T2(1:length(t)))
plot(t,T3(1:length(t)))
title("Gráfica de Torques vs tiempo")
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Torque
(Nm)')
hold off
legend({'USV1','USV2','USV3'})

figure
plot(t,f1_1(1:length(t)),r,'DisplayName','Fuerza de Motor Izq. - USV1')
hold on
plot(t,f2_1(1:length(t)),m,'DisplayName','Fuerza de Motor Der. - USV1')
plot(t,f1_2(1:length(t)),g,'DisplayName','Fuerza de Motor Izq. - USV2')
plot(t,f2_2(1:length(t)),y,'DisplayName','Fuerza de Motor Der. - USV2')
plot(t,f1_3(1:length(t)),c,'DisplayName','Fuerza de Motor Izq. - USV3')
plot(t,f2_3(1:length(t)),b,'DisplayName','Fuerza de Motor Der. - USV3')
title("Gráfica de Fuerzas parciales vs tiempo")

```

```
xlabel('Tiempo (s)')  
ylabel('Longitud (m)')
```

```

hold
off
lege
nd

figure
plot(t,alfa12(1:length(t))*180/
pi) hold on
plot(t,alfa13(1:length(t))*180/
pi)
title("Gráfica de Ángulos formados vs tiempo")
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Ángulo
(°)') hold off
legend({'Ángulo entre USV1 y USV2','Ángulo entre USV1 y USV3'})

figure
plot(t,l12(1:length(t))
)) hold on
plot(t,l13(1:length(t)
))
title("Gráfica de Distancias de separación vs tiempo")
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Distancia
(m)') hold off
legend({'Distancia entre USV1 y USV2','Distancia entre USV1 y USV3'})

```

B.4. Listado de partes e insumos

Lista de componentes adquiridos hasta el momento:

- BUTON INOX M5X10 CON ARANDELAS INOX
- BUTTON M5X10 INOX
- MODULO GPS NEO-6M
- RESIST 330 H-1/2W
- Bornera Do 2P 12m
- Pin Header 1x40 Hembra-s
- Espadin Macho Header 1x40-s-colores
- NUT M5 CABEZA DE MARTILLO
- ANGULO 20X20
- MPU 9250
- U-BOLT DE 3/8P DE DIÁMETRO DE ROSCA X 1.1/4 EN
ACERO GALVANIZADO
- CIENTO DE TUERCAS REMACHABLES M6 EN ACERO INOXIDABLE
- 4 Thrusters T200

- 4 ESC
- 1 PCB para el control del USV auxiliar

B.5. Exploración de proveedores de materiales y componentes

Set de propelas amarillas	4	\$8.00	\$32.00	
Propulsor T200	4	\$190.00	\$760.00	
ESC Controlador de propulsores	4	\$36.00	\$144.00	
Wetlink Penetrator M14 WLP-M14-9.5MM-LC	8	\$16.00	\$128.00	
Sellos para Penetrator 9.5mm- Pack 10 und	1	\$18.00	\$18.00	
O-rings Spare Bulkhead- set 10 pzas M14	2	\$4.00	\$8.00	
Mounting Bracket	4	\$36.00	\$144.00	
Costo de envio	1	\$92.00	\$92.00	
Módulo GPS NEO 8M u Blox	3	\$23.00	\$69.00	JOSLIN PERÚ
Lipo Pack 20000mAh 4S 12C	4	\$142.00	\$568.00	HOBBYKING
IMAX B6 AC-V2 cargador / descargador de 1-6 células	1	\$31.00	\$31.00	
SHIELD XBEE PARA ARDUINO	3	\$6.41	\$19.23	ElectroPro
Resistencia 330 Ohms 0.5W	100	\$0.01	\$1.28	Singapur Electronics
Bornera 2 pines 12m	15	\$0.26	\$3.85	
Pin Header Hembra 1x40	7	\$0.26	\$1.79	
Espadin Macho Header 1x40	7	\$0.26	\$1.79	
ANCOR, CABLE MARINO DOBLE C/BLANCO 14 AWG/2 x pie	20	S/.4.40	S/.88.00	HARBOR MARINE
COMPONENTES MECÁNICOS				
Perfiles V-SLOT 20-40 L 0.995 m	6	\$24.36	\$146.15	Naylamp Mechatronics
Bracket de esquina de 90° 20x20x17	5	\$0.85	\$4.23	
Tuerca en T de inserción M5	10	\$0.26	\$2.56	