



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

Diseño de un Vehículo Submarino Autónomo

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

André Jheyson Rojas Granados

ASESOR: Franco Hidalgo Herencia

Lima, mayo del 2014

El presente trabajo presenta una propuesta para el desarrollo de un vehículo submarino autónomo que ayude a las embarcaciones dedicadas a la pesca de anchoveta a estimar el porcentaje de especies juveniles bajo sus redes para así ayudar a la conservación de la especie. Actualmente, en el Perú, la captura de ejemplares pequeños es sancionada con una multa que es proporcional al volumen de pesca que infringe la norma. Por este motivo, se desea que el proyecto propuesto resulte más económico que el pago de las multas, y así ser considerado como una alternativa atractiva por las empresas pesqueras.

Se inicia el trabajo presentando en el capítulo 1 la descripción de la problemática. Además, se detalla la normativa presente en el país para la regulación de la pesca de anchoveta. En el capítulo 2, se presenta el concepto que solucionará la problemática expuesta. También, se describen los requerimientos que debe cumplir el sistema mecatrónico para dar solución a la problemática. En el capítulo 3, se describe el sistema mecatrónico propuesto y se detalla su funcionamiento. Además, se presenta y describe las características de los sensores, actuadores y demás componentes que lo integran. Por otro lado, se presentan los planos mecánicos y diagramas esquemáticos del sistema, así como también se da una breve descripción de su funcionamiento dentro del sistema. Por último, se presenta y describe el diagrama de flujo del control del sistema mecatrónico y se describe. En el capítulo 4, se presenta el presupuesto requerido para la implementación del sistema mecatrónico, el cual es avalado por proformas que son adjuntadas en los anexos. Finalmente, en el capítulo 5, se presentan las conclusiones respecto al trabajo realizado.



1. PRESENTACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	6
2. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA MECATRÓNICO Y PRESENTACIÓN DEL CONCEPTO	8
2.1 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA MECATRÓNICO	8
2.2 CONCEPTO DE LA SOLUCIÓN	9
3. SISTEMA MECATRÓNICO	11
3.1 DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA MECATRÓNICO	11
3.2 SENSORES Y ACTUADORES	13
3.3 PLANOS DEL SISTEMA MECATRÓNICO	20
3.4 DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS DE LOS CIRCUITOS DEL SISTEMA MECATRÓNICO	39
3.5 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA DE CONTROL	46
4. PRESUPUESTO	54
5. CONCLUSIONES	56
6. BIBLIOGRAFÍA	57

Capítulo 1

Presentación de la problemática

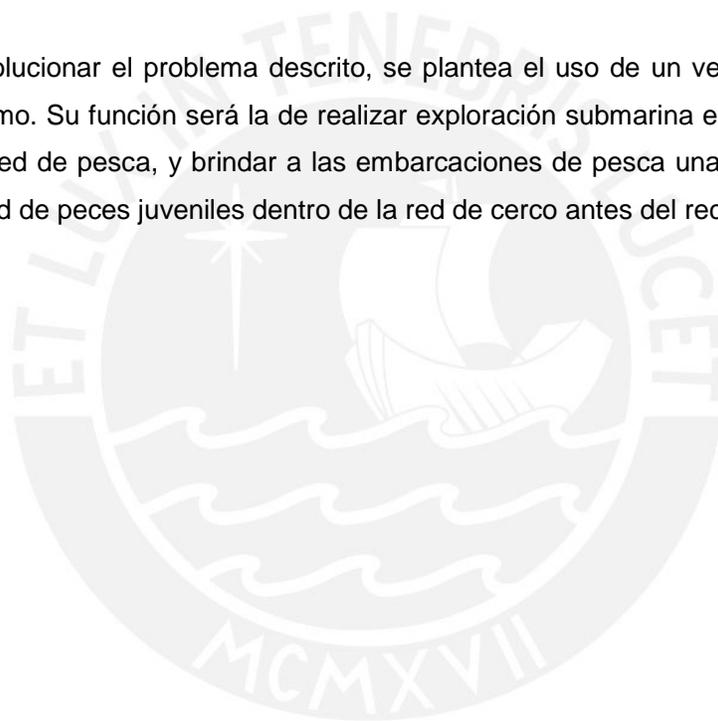
Actualmente la actividad pesquera es de real importancia para el Perú, pues el país produce aproximadamente el 30% de la harina de pescado a nivel mundial [1], siendo así el mayor exportador de harina de pescado a nivel mundial [2].

Dentro de las especies que forman parte de la actividad pesquera en nuestro país, la pesca de anchoveta es la más importante pues es la especie más abundante del litoral peruano llegando a constituir el 86.2 % del total de desembarques de recursos marinos en el 2011 [3]. Su abundancia se debe a la corriente de Humboldt, la cual genera un buen clima para su desarrollo, llegando a medir hasta 20 cm [4]. Otra de sus características es que la anchoveta es una especie que se traslada formando cardúmenes; por lo que esta especie es capturada usando redes de cerco, también conocidas como bolicheras [5]. Este tipo de pesca consiste en ubicar al cardumen para luego rodearlo con la red, seguidamente se captura a los peces cerrando el fondo de la red, y finalmente esta se levanta con los peces dentro. La pesca de anchoveta se hizo popular en la década de los cincuentas donde el 92% de los desembarques pesqueros estaban formados por anchovetas [6]. En aquellas épocas, la falta de regulación de parte del gobierno y la sobreexplotación de parte de las empresas pesqueras produjo el colapso de esta actividad económica [7]. Es por este motivo, que actualmente existen medidas comprendidas en el reglamento de la Ley General de Pesca Ley N° 25977, que regulan esta actividad para así preservar el volumen de esta especie en el litoral. Una de estas normas, es la prohibición de la extracción de ejemplares juveniles de anchoveta, teniendo en cuenta para ello su longitud total. La talla mínima de captura es determinada por el Ministerio de la Producción teniendo como recomendación los estudios con base científica de IMARPE (Instituto del Mar del Perú). Actualmente, los estudios de IMARPE consideran a una anchoveta juvenil si esta mide menos de 12 cm de largo en total [8]. Al llegar a tierra, las embarcaciones deben permitir la inspección de las especies extraídas por parte de las autoridades. Si la cantidad de anchovetas juveniles excede la tolerancia definida por IMARPE, 10% del total de carga para las anchovetas [8], la empresa responsable recibirá una sanción económica determinada en el Reglamento de Inspecciones y Sanciones Pesqueras y Acuícolas (RISPAC). Esta sanción consiste en el pago de un monto económico proporcional al número de toneladas que no cumplieron con la talla mínima de captura; y del decomiso de la carga. Si bien es cierto, el objetivo de la norma es evitar la captura de peces pequeños que podrían reproducirse en el

futuro; en la práctica este objetivo no se cumple adecuadamente pues al tratar de evitar las multas, las embarcaciones recurren a un acto denominado descarte, que consiste en lanzar los peces juveniles al mar antes de la revisión de la carga en tierra. Al lanzar los peces devuelta al mar, estos ya están muertos, por lo cual el impacto al ecosistema no se soluciona.

En el anexo 1, se presenta una entrevista a Carlos Paredes, director de Intelfin, empresa que brinda asesoría legal y financiera al mercado. En dicha entrevista se le pregunta acerca de la normativa actual que prohíbe la pesca de anchoveta juvenil y si esta norma cumple sus objetivos adecuadamente a lo que él refiere que la normativa actual es inadecuada pues las embarcaciones no conocen lo que se encuentra bajo sus redes hasta que las levantan a la superficie, por lo que en la mayoría de casos, los peces juveniles son lanzados al mar para evitar sanciones.

Para solucionar el problema descrito, se plantea el uso de un vehículo submarino autónomo. Su función será la de realizar exploración submarina en el área cubierta por la red de pesca, y brindar a las embarcaciones de pesca una estimación de la cantidad de peces juveniles dentro de la red de cerco antes del recojo.



Capítulo 2

Requerimientos del sistema mecatrónico y presentación del concepto

2.1 Requerimientos del sistema mecatrónico

2.1.1 Requerimientos físicos - mecánicos

- El sistema debe poder sumergirse hasta 50 metros y soportar la presión del agua a esa profundidad.
- El sistema debe presentar una forma hidrodinámica para disminuir la resistencia del agua al avance.
- El sistema debe asegurar que los componentes electrónicos no se vean afectados por el agua.
- El sistema debe ser ligeramente flotante, pues si sucediese algún problema el sistema debe ser capaz de ascender a la superficie.
- El sistema debe contar con 3 grados de libertad, que le permitan realizar el movimiento de avance – retroceso, descenso – ascenso y giro horario – antihorario.
- Su movimiento no debe ser afectado por las perturbaciones del entorno.
- El sistema debe pesar menos de 20 Kg para que pueda ser cargado por dos personas.
- El sistema debe caber en un volumen de 0.6 m largo - 0.4 m ancho - 0.4 m alto.

2.1.2 Requerimientos electrónicos

- El sistema debe contar con una fuente de energía portátil que le permita desarrollar una misión de 20 minutos como mínimo, ya que de acuerdo a datos históricos, las embarcaciones tardan ese tiempo como mínimo realizando otras labores [31].
- El sistema debe poder estimar su posición bajo el agua.
- El sistema debe contar con un sistema de visión que permita estimar el tamaño de los objetos frente al AUV.
- El sistema debe poder realizar el procesamiento de imágenes en bajas condiciones de luz.
- El sistema debe contar con un sistema de comunicación que le permita interactuar con la base mientras se encuentra bajo el agua.

- El sistema debe ser capaz de adquirir adecuadamente la información proveniente de los sensores.

2.1.3 Requerimientos de control

- El sistema debe ser capaz de ser inicializado remotamente.
- El sistema debe ser capaz de procesar imágenes y controlar su movimiento al mismo tiempo.
- El sistema debe ser capaz de estimar el porcentaje de peces juveniles en el cardumen.
- El sistema debe ser capaz de realizar una trayectoria previamente definida.

2.2 Concepto de la solución

Para este proyecto se plantea el uso de un vehículo submarino autónomo, AUV por sus siglas en inglés, (*Autonomous Underwater Vehicle*). En la figura 2.1, se muestra una vista isométrica del sistema mecatrónico propuesto.



Figura 2.1: Vista general del sistema mecatrónico

El AUV se colocará en el centro del cerco por uno de los botes que realiza el tejido de la red. El AUV deberá sumergirse después de que las embarcaciones hayan tejido la red de cerco, para luego desplazarse de acuerdo a una trayectoria previamente definida. Mientras se desplaza bajo la superficie del agua determinará la talla de algunos peces, y mediante métodos estadísticos estimará el porcentaje de peces juveniles en todo el cardumen. El AUV hará uso de visión por computadora para determinar la talla de los peces. Dado que, los peces que se encuentran más distantes a la cámara aparentan ser más pequeños y los más cercanos a la cámara aparentan ser más grandes, se debe conocer también la distancia de los peces al AUV, para que luego los peces se encuentren en la misma escala. Para ello, se usa dos cámaras y mediante visión estereoscópica poder conocer la distancia de los peces al AUV. El AUV cuenta con 4 propulsores para

facilitar su maniobrabilidad, pues se desea que tenga 3 grados de libertad. En primer lugar, cuenta con dos propulsores que se encuentran en la parte media, los cuales permiten controlar la profundidad del vehículo. Cabe resaltar que en todo momento ambos propulsores deben funcionar en el mismo sentido, de otra forma el vehículo podría girar de forma no deseada. En segundo lugar, cuenta con otros dos propulsores que se encuentran en la parte trasera, los cuales permiten controlar el avance y giro del vehículo. En el caso en el que ambos propulsores funcionen en sentido opuesto el vehículo girará. Mientras que, en el caso en el que ambos propulsores giren en el mismo sentido, el vehículo se trasladará axialmente. Como se puede observar en la figura 2.1, el vehículo cuenta con dos cámaras en la parte delantera, las cuales se encuentran dentro de cada una de las carcasas y pueden adquirir imágenes del exterior a través de un visor transparente. La forma de los visores es semiesférica para que el vehículo posea una forma más hidrodinámica. Por otro lado, cabe mencionar que a partir de 15 m la luz es escasa [9]; por lo cual, el vehículo cuenta con iluminación LED para permitir el adecuado procesamiento de imágenes. Se plantea el uso de comunicación inalámbrica para permitir la comunicación entre el AUV y la embarcación base. A través de esta comunicación el usuario puede conocer la posición del AUV, así como también iniciar y detener la misión remotamente. Finalmente, los elementos que se encuentren fuera de las carcasas deben comunicarse con el interior, que es donde se encuentra el controlador central, con cables y conexiones herméticas. En las figuras 2.2 y 2.3, se muestran las vistas superior y frontal del sistema mecatrónico propuesto.

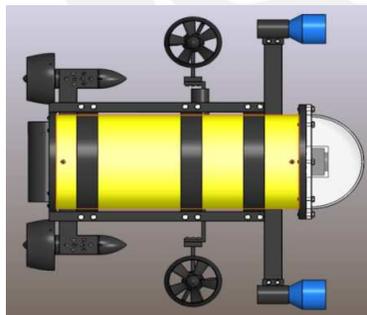


Figura 2.2: Vista superior del sistema mecatrónico

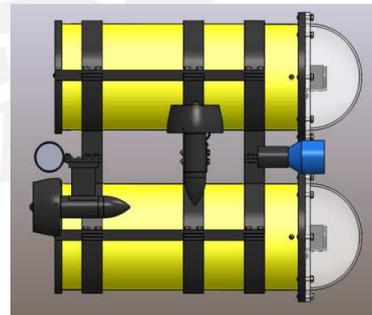


Figura 2.3: Vista frontal del sistema mecatrónico

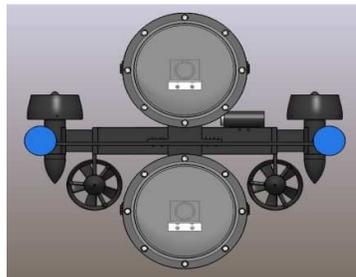


Figura 2.4: Vista lateral del sistema mecatrónico

Capítulo 3

Sistema mecatrónico

3.1 Diagrama de funcionamiento del sistema mecatrónico

El sistema mecatrónico propuesto se compone de 5 subsistemas claramente definidos. En la figura 3.1 se presenta el diagrama de bloques del sistema mecatrónico.

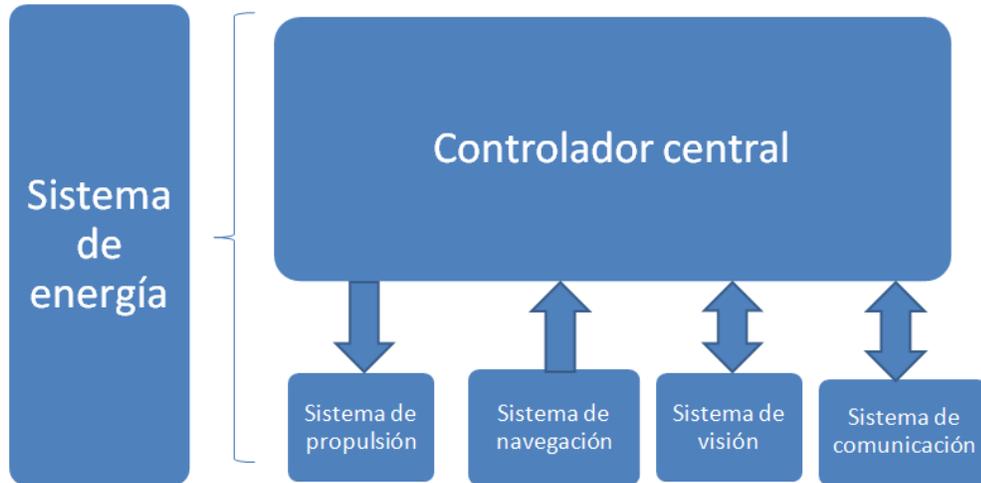


Figura 3.1: Diagrama de bloques del sistema mecatrónico

Se puede observar que todos los subsistemas interactúan con el controlador central. A continuación, se describe con más detalle cada subsistema.

- **Sistema de energía:**

Este sistema está conformado por un conjunto de baterías, las cuales brindan la energía necesaria para el funcionamiento de todo el sistema mecatrónico. Este subsistema interactúa con los demás porque es el que brinda la energía necesaria para el funcionamiento de cada uno. Cabe mencionar que las baterías se han separado en dos partes: aquellas que alimentan a los dispositivos de baja potencia y aquellas que brindan energía a los dispositivos de alta potencia.

- **Sistema de navegación:**

Es aquel que se encarga de brindar al controlador central la información acerca de la posición del AUV. Con esta información, el procesador central es capaz de seguir la trayectoria previamente definida.

- **Sistema de visión :**

Es aquel que se encarga del procesamiento de imágenes necesario para el desarrollo de la misión del vehículo. El procesamiento de imágenes en el AUV tiene dos propósitos. En primer lugar, el propósito principal es usar el procesamiento de imágenes para poder hallar el tamaño de los peces. Dado que en una imagen algunos peces pueden estar detrás de otros, y así aparentar ser más pequeños, se hace uso de visión estereoscópica para conocer la distancia de los peces al vehículo, y así poder tener los tamaños de los peces en una misma escala con el fin de conocer su tamaño real. En segundo lugar, el procesamiento de imágenes también es necesario en el inicio de la misión para hallar el límite de la red de cerco, con el fin de establecer los parámetros necesarios para definir su trayectoria. Por otro lado, dado que los cardúmenes de anchoveta se encuentran hasta profundidades de 50 metros [10], el AUV deberá sumergirse hasta esa profundidad. Sin embargo; a esa profundidad la luz es escasa [9], por lo que se usa lámparas LED sumergibles para iluminar las profundidades, y así realizar un adecuado procesamiento de imágenes. Como se puede observar en el diagrama de la figura 3.1, el controlador central interactúa de forma bidireccional con este sistema, pues recibe información de parte de las cámaras y envía las señales necesarias para el encendido y apagado de la iluminación.

- **Sistema de propulsión:**

Es aquel que se encarga de interpretar las señales provenientes del controlador central para cumplir con la trayectoria definida. Se encarga de ejercer el empuje que se requiere para el movimiento del AUV. Para ello, se cuenta con propulsores que son ubicados estratégicamente para brindar al AUV una buena maniobrabilidad.

- **Sistema de comunicación:**

Este sistema cumple tres propósitos en el AUV. En primer lugar, este sistema permite la asignación de parámetros iniciales. Una laptop se comunica con el AUV con el fin de transmitirle los parámetros iniciales que son: la profundidad de la red y el tiempo estimado de la misión. En segundo lugar, este sistema permite el inicio y parada de la misión de manera remota. Luego de que el AUV se encuentre sumergido, el usuario a través de su laptop indica al AUV que la misión debe iniciarse. Del mismo modo, mientras el AUV se encuentre sumergido, el usuario puede indicarle al AUV que abandone la misión y ascienda a la superficie. Por último, este sistema también permite informar al usuario acerca de la posición del AUV durante el desarrollo de su misión. Como se puede observar en el diagrama,

este sistema interactúa de manera bidireccional con el procesador central, pues este envía y recibe información al controlador central.

- **Controlador central:**

Es aquel que integra las funciones de los demás sistemas. Su funcionamiento consiste en inicialmente, recibir de parte del usuario la trayectoria planeada para el desarrollo de la misión. Luego, al sumergirse se mueve de acuerdo a la trayectoria definida por el usuario, para ello usa la información de posición que brinda el sistema de navegación y envía las señales adecuadas al sistema de propulsión para el movimiento del AUV. Además, de manera paralela al control de movimiento, el controlador debe enviar señales a las cámaras e iluminación para la adquisición de imágenes, al recibir las imágenes de las cámaras, realiza el procesamiento necesario para hallar el porcentaje de peces juveniles en el cardumen. Finalmente, asciende a la superficie al término de su misión e informa al usuario respecto a los resultados obtenidos.

3.2 Sensores y actuadores

A continuación se detallará los sensores, actuadores y demás dispositivos usados por el vehículo para su funcionamiento.

3.2.1 IMU (Inertial Measurement Unit)

Es un dispositivo electrónico que internamente cuenta con acelerómetros y giroscopios en los 3 ejes. La función de este sensor es medir los cambios de orientación y aceleración del cuerpo al que se encuentre unido. Con estos datos el controlador central, puede conocer la posición y orientación del AUV, relativas a una posición inicial. Por otro lado, el inconveniente de usar un IMU es que los errores de posición y orientación aumentan con el tiempo. Esto debido a que se calcula estos parámetros integrando la aceleración y los cambios de orientación, y en la integración también se incluye los errores de medición propios del sensor. Por este motivo, para medir la posición y orientación del AUV no se debe usar exclusivamente al IMU. En este sentido, para este proyecto se usa un receptor GPS, el cual ofrece coordenadas globales para corregir el error del IMU. En la figura 3.2.1, se muestra el IMU escogido.

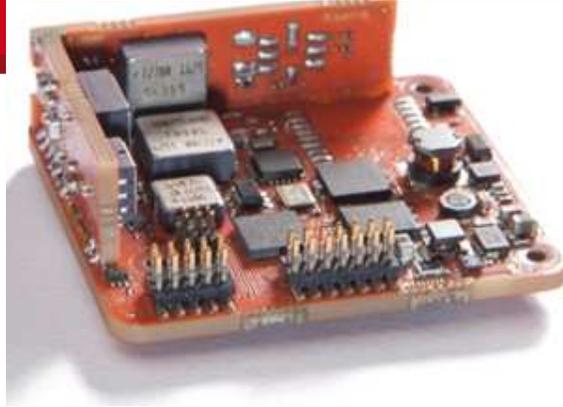


Figura 3.2.1: Vista isométrica del IMU

A continuación, se detallan las características del IMU MTi-30-AHRS-2A5G4-O (Tabla 3.2.1).

IMU	
Marca	Xsens
Código	MTi-30-AHRS-2A5G4-O
Dimensiones	37 x 33 x 12 mm
Peso	11 g
Interfaz	RS-232
Voltaje de operación	4.5 - 34 v
Potencia de consumo típica	480 - 570 mW
Frecuencia de salida	Hasta 2KHz

Tabla 3.2.1: Características del IMU

3.2.2 GPS (Global Positioning System)

Es un dispositivo electrónico que permite conocer la posición global del vehículo. Los datos del receptor GPS son absolutos, a diferencia del IMU cuyos datos son relativos a una posición inicial. Como se mencionó anteriormente, el error de los datos del IMU aumenta con el tiempo, por este motivo, se usa el receptor GPS para corregir el error de los datos del IMU. Cabe agregar que, las señales que recibe el receptor GPS de parte de los satélites no pueden penetrar el agua [11]. Por este motivo, el AUV debe ascender a la superficie cada cierto tiempo para realizar la corrección de datos. Además cabe señalar que con el módulo GPS se inicializa la posición inicial que requiere el IMU. El módulo GPS elegido cuenta con una antena interna, por lo cual no es necesario la conexión a una antena externa. En la figura 3.2.2, se muestra el GPS escogido.



Figura 3.2.2: Vista isométrica del GPS

A continuación, se detallan las características del GPS MT3339 Chipset (Tabla 3.2.2).

GPS	
Marca	MediaTek
Código	MT3339 Chipset
Dimensiones	30 x 30 mm
Interfaz	TTL - serial
Voltaje de operación	3 - 4.2 V
Precisión de posición	< 3 m
Frecuencia de salida	1 - 10 Hz

Tabla 3.2.2: Características del GPS

3.2.3 Cámara

Se usa el procesamiento de imágenes para conocer el tamaño de los peces. Un problema que surge para la estimación de la talla de peces mediante procesamiento de imágenes es que al estar los peces a distintas distancias del AUV, no se puede determinar su talla real a partir de una imagen. Esto debido a que los más lejanos aparentan ser más pequeños y viceversa. Por este motivo, se requiere conocer la distancia de los peces al AUV por lo que se recurre a visión estereoscópica, la cual necesita al menos dos cámaras en dos posiciones distintas. A partir de las imágenes adquiridas por las diferentes cámaras, se analiza la disparidad entre ambas imágenes para determinar la distancia de los peces al AUV. El tipo de cámara seleccionada interactúa con el controlador central a través de un puerto USB 2.0. A continuación se detallará las características de las cámaras elegidas. La cámara posee un sensor de 1.3 megapíxeles, por lo que se pueden obtener imágenes de buena resolución. Esta cámara fue elegida por su calidad superior a la mayoría de cámaras con puerto USB, pues la mayoría de cámaras que usan este puerto de comunicación son usadas principalmente para videoconferencias. En la figura 3.2.3 se muestra la cámara escogida.



Figura 3.2.3: Cámara USB

A continuación, se detallan las características de la cámara Point Grey Chameleon USB (Tabla 3.2.3).

Cámara	
Marca	Point Grey
Código	Chameleon USB
Resolución	1.3 MP
Sensor	ICX445 EXview HAD CCD
Tamaño del sensor	1/3 "
Interfaz	USB 2.0
Dimensiones	44 x 25.5 x 41 mm
Peso	37 g

Tabla 3.2.3: Características de la cámara

3.2.4 Sensor de presión

Este sensor permite conocer la presión del agua sobre el vehículo. Dado que la presión del agua depende directamente de la profundidad bajo el agua, se puede conocer de manera indirecta la profundidad a la que se encuentra el vehículo. Para conocer la profundidad del AUV, se usará principalmente este sensor mas no al IMU pues la profundidad estimada a través de la presión del agua no depende del tiempo, por lo que los datos de este sensor son más confiables. En la figura 3.2.4 se muestra el sensor de presión escogido.



Figura 3.2.4: Vista isométrica del sensor de presión

A continuación, se detallan las características del sensor de presión MSI UltraStable (Tabla 3.2.4).

Sensor de presión	
Marca	Measurement Specialities
Código	MSI UltraStable-300
Dimensiones	~ 6 cm
Rango	0 - 100 psi
Salida	4 - 20 mA

Tabla 3.2.4: Características del sensor de presión

3.2.5 Propulsor

Este elemento se encarga de ejercer el empuje necesario para el movimiento del AUV. Para que éste pueda moverse libremente bajo la red, debe ser maniobrable, por lo cual se usa una combinación de 4 propulsores, los cuales se encuentran estratégicamente ubicados para que el AUV cuente con 3 grados de libertad. Se desea que el AUV sea capaz de realizar los siguientes movimientos: avance retroceso, ascenso – descenso y giro horario – anti-horario.

Para este proyecto se eligió los propulsores ofrecidos por la empresa CrustCrawler (fig. 3.2.5) cuyas características se presentan en la tabla 3.2.5.



Figura 3.2.5 Vista isométrica del propulsor

Propulsores	
Marca	CrustCrawler
Código	400 HFS-L Hi-Flow
Peso en aire	453 g
Peso en agua	255 g
Voltaje de operación	12 - 50 V
Profundidad máxima	300 m
Empuje máximo	6.79 Kg

Tabla 3.2.5: Características del propulsor

3.2.6 Iluminación

Bajo el agua no existe suficiente luz para poder realizar un adecuado procesamiento de imágenes, pues es un ambiente oscuro. Por este motivo se requiere iluminación extra que permita adquirir imágenes debajo del mar. La lámpara elegida es de tipo LED y puede ser usada completamente sumergida, pues está diseñada para ese entorno. Es por ello, que cuenta con un conector hermético que garantiza su correcto funcionamiento bajo el agua. En la figura 3.2.6, se muestra la lámpara elegida.



Figura 3.2.6: Vista isométrica de la lámpara

A continuación, se detallan las características de la lámpara Bowtech LED-G-SERIES-1600 (Tabla 3.2.6).

Lámpara	
Fabricante	Bowtech
Modelo	LED-G-SERIES-1600
Voltaje de entrada	24 V DC
Potencia de consumo	16.8 W
Luminosidad	1600 Lumens
Profundidad máxima	300 m
Dimensiones	80.3 x 47.8 mm
Peso en aire	207 g
Peso en agua	100 g
Ángulo de rayo	85 °

Tabla 3.2.6: Características de la lámpara

3.2.7 Modem acústico

Se mencionó anteriormente que se requiere de un sistema de comunicación en el sistema mecatrónico propuesto. Además, dado que se propone un vehículo autónomo, la comunicación debe darse de manera inalámbrica. Sin embargo, los medios de comunicación inalámbricos comunes como Wi-Fi, RF o Bluetooth funcionan a través del aire. Estos estándares de comunicación sólo pueden penetrar unos pocos metros a través del agua pues el agua atenúa las ondas de alta frecuencia. Sin embargo, ondas acústicas si pueden operar bajo el agua,

aunque poseen una baja tasa de transferencia de datos. Es por este motivo que se usa un módem acústico para permitir la comunicación éntrele AUV y el usuario. En la figura 3.2.7, se muestra el módem acústico elegido.



Figura 3.2.7: Vista isométrica del módem acústico

A continuación, se detallan las características del módem acústico SAM-1 (Tabla 3.2.7).

Modem acústico	
Marca	Desert Star
Modelo	SAM-1
Dimensiones	135 mm L x 40 mm D
Peso en aire	230 g
Peso en agua	50 g
Interfaz	RS-232
Profundidad máxima	300 m
BitRate de transmisión	3 - 23 bits/s
Bitrate de recepción	3 - 96 bits/s
Rango	1000 m

Tabla 3.2.7: Características del módem acústico

3.2.8 Paquete de Baterías

Dado que el sistema propuesto es autónomo, el AUV debe contar con una fuente de energía propia y no depender de una base externa para que le provea energía. Por este motivo, cuenta con un paquete de baterías recargables que brindan al AUV de la energía necesaria para su funcionamiento. En las figuras 3.2.8.1 y 3.2.8.2, se muestran las baterías elegidas.



Figura 3. 2.8.1: Vista isométrica del primer tipo de baterías



Figura 3. 2.8.2: Vista isométrica del segundo tipo de baterías

A continuación, se detallan las características de las baterías Venom-30C-3S-7500mAh (Tabla 3.2.8.1) y de las baterías Venom-35C-4S-4500mAh (Tabla 3.2.8.2).

Batería	
Marca	Venom
Código	Venom 30C 3S 7500mAh
Dimensiones	106 x 36 x 25 mm
Tipo	Li – Po
Voltaje	11.1 V
Capacidad	7500 mA

Tabla 3.2.8.1: Características del primer tipo de baterías

Batería	
Marca	Venom
Código	Venom 35C 4S 4500mAh
Dimensiones	106 x 36 x 25 mm
Tipo	Li – Po
Voltaje	14.8 V
Capacidad	4500 mA

Tabla 3.2.8.2: Características del segundo tipo de baterías

3.3 Planos del sistema mecatrónico

A continuación, se presentarán los planos mecánicos que forman parte del AUV. Además, se presentará una breve descripción de cada uno. Cabe mencionar que estos planos son presentados a tamaño completo en el anexo 8.

Ensamble Total

En la figura 3.3.1, se puede observar el ensamblaje total del AUV. Hay dos carcasas, las cuales contienen a los elementos electrónicos que no pueden operar sumergidos en el agua. Se decidió usar dos carcasas dispuestas de manera vertical para brindar estabilidad al AUV. Esta disposición ha sido usada anteriormente por [12] y [13] obteniendo buenos resultados. En el anexo 5 se explica con más detalle por qué esta disposición de las carcasas permite que el AUV sea más estable. La carcasa superior contiene a las tarjetas electrónicas y elementos livianos que forman parte del sistema mecatrónico. Mientras que, la carcasa inferior contiene a las baterías, que son más pesadas que las tarjetas electrónicas. Ambas carcasas

están sostenidas y unidas por 3 soportes verticales, los cuales son unidos y fijados por barras horizontales. Además, cada carcasa contiene en la parte delantera una cámara, las cuales serán usadas para realizar visión estereoscópica. Por otro lado, se puede observar los soportes para los elementos que operan totalmente sumergidos bajo el agua, los cuales son: los propulsores, el módem acústico, el sensor de presión y las iluminaciones LED

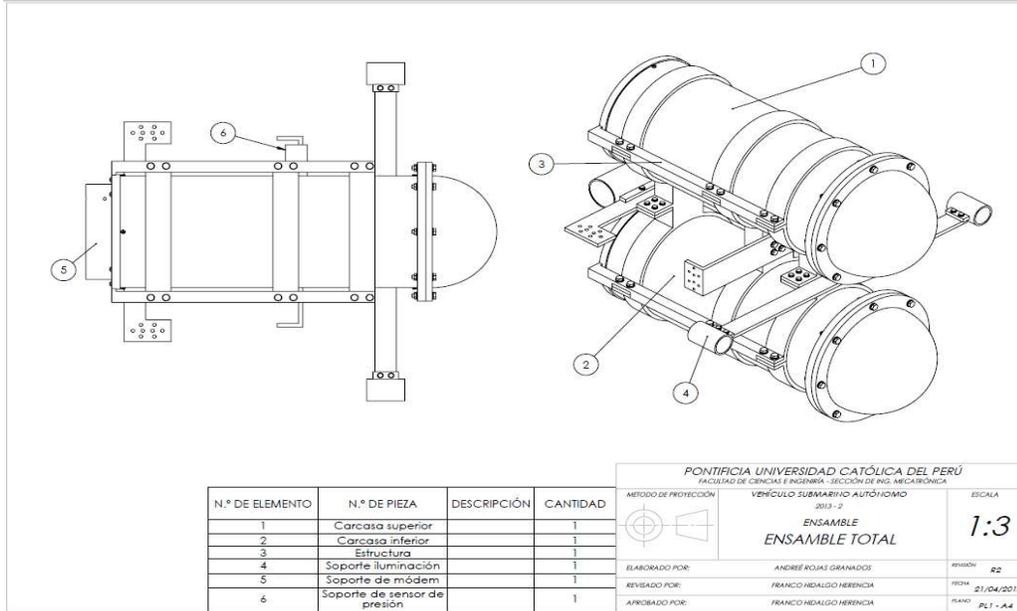


Figura 3.3.1: Plano del ensamblaje del AUV

Carcasas

En las figuras 3.3.2 y 3.3.3, se puede observar los ensamblajes de la carcasa superior e inferior respectivamente.

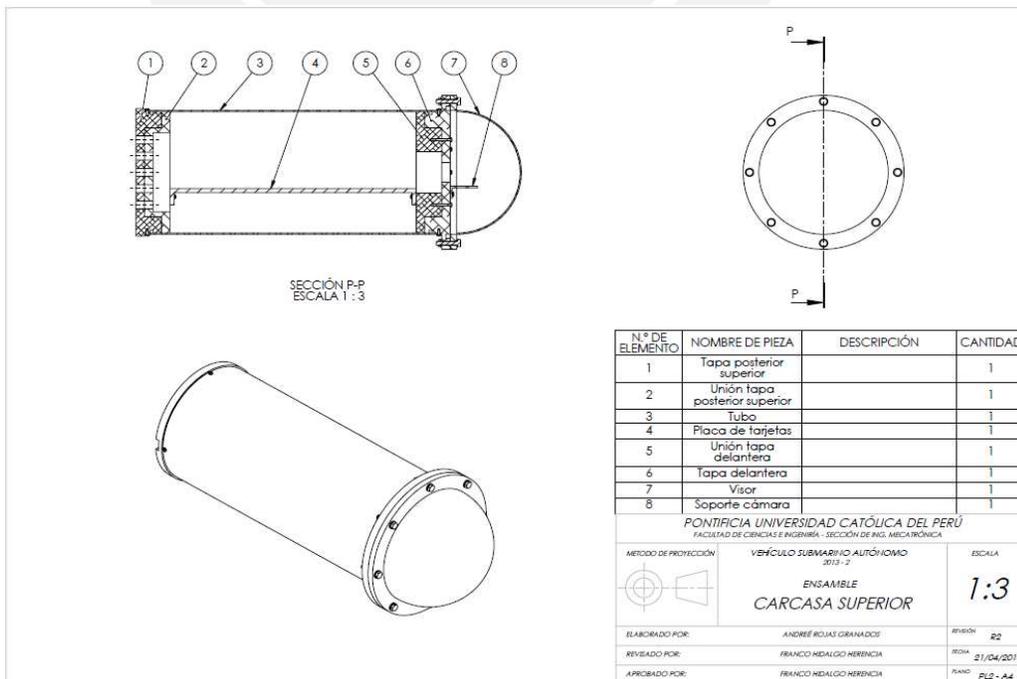


Figura 3.3.2: Plano de ensamblaje de la carcasa superior

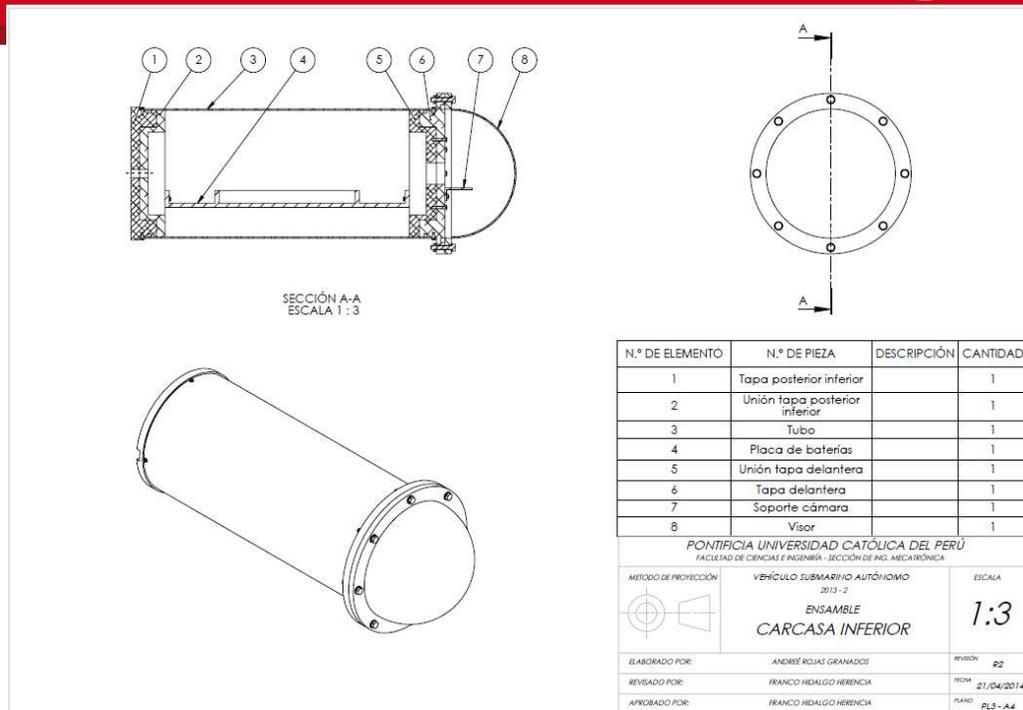


Figura 3.3.3: Plano de ensamble de la carcasa inferior

Cabe mencionar, que las carcasas superior e inferior son similares y sólo se diferencian en la tapa trasera, que tiene los agujeros necesarios para los conectores acuáticos. La carcasa superior contiene más conectores, puesto que en esta se encuentran las tarjetas que interactúan con los elementos que están fuera de las carcasas. Por el contrario, la carcasa inferior solo tiene 1 conector, el cual sirve para alimentar las tarjetas y dispositivos electrónicos, además conectar la cámara inferior con la carcasa inferior. Los conectores y cables acuáticos usados son de la marca SeaCon, los cuales han sido usados por [14] obteniendo resultados óptimos. En [15] sugieren usar estos conectores sobre otros métodos más económicos que a largo plazo permiten filtraciones. Los conectores descritos anteriormente, sirven para que no exista filtraciones en las conexiones de cables entre las carcasa y el exterior; sin embargo, puede existir filtraciones entre la conexión de las tapas con el tubo. Por lo cual, se usa O-rings, elementos ampliamente usados para sellar e impedir filtraciones de agua. Estos elementos deben estar presionados para que cumplan su función adecuadamente. En el ensamblaje mostrado se puede observar las cavidades designadas para sostener a los O-rings. Tanto en la tapa trasera como delantera, se los coloca sobre la superficie de las tapas, las cuales al estar dentro del tubo presionan a los O-rings propiciando así su adecuado funcionamiento. Por otro lado, también se coloca un O-ring en la conexión entre la tapa delantera y el visor semiesférico. A diferencia del

caso anterior, el O-ring es ahora presionado por las caras planas de la tapa delantera y del visor.

Estructura

La función de esta estructura es mantener unidas a las carcasas, transmitir el movimiento de los propulsores a las carcasas y sostener a los elementos electrónicos que operan sumergidos en el agua. En la figura 3.3.4, se observa el ensamblaje correspondiente a la estructura.

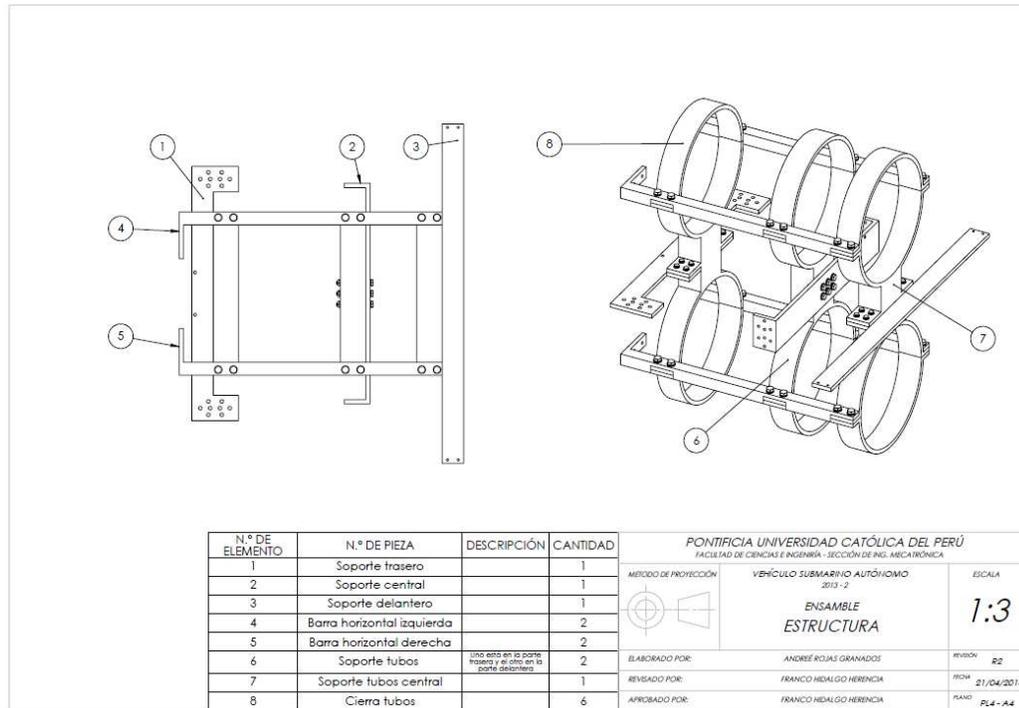


Figura 3.3.4: Plano de ensamble de la estructura

Tapa posterior carcasa superior

Esta pieza está hecha de aluminio debido a su fácil mecanizado y es la que cuenta con las cavidades necesarias para colocar los conectores que permitirán la conexión entre el interior de la carcasa y el exterior. Se observa que hay 9 cavidades para 9 conectores en total. Los conectores correspondientes son: 4 conectores para los propulsores, 2 conectores para las iluminaciones, 1 conector para el sensor de presión, 1 conector para el módem acústico y 1 conector para la comunicación con la carcasa inferior. Además, la tapa cuenta con una cavidad para colocar un O-ring, el cual al estar presionado impide el paso del agua hacia el interior de la carcasa. Y por último, a través de los agujeros transversales puede ser fijado al tubo. En la figura 3.3.5, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

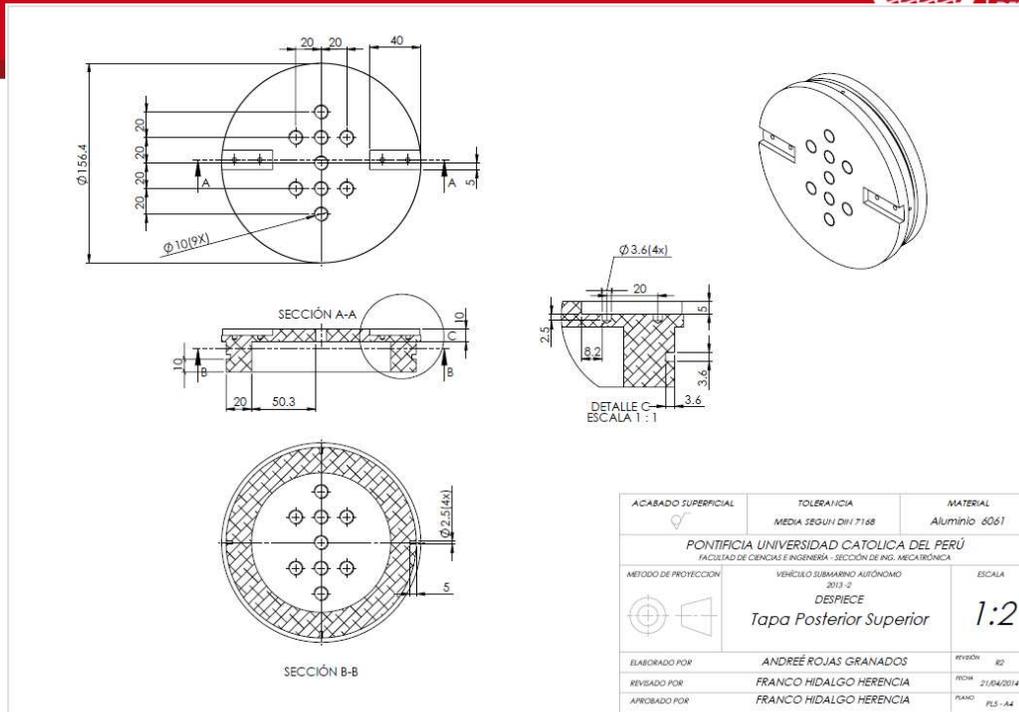


Figura 3.3.5: Plano de la tapa posterior superior

Tapa posterior carcasa inferior

Esta pieza es similar a la que se describió recientemente. La diferencia está en que esta posee solo un conector. En la figura 3.3.6, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

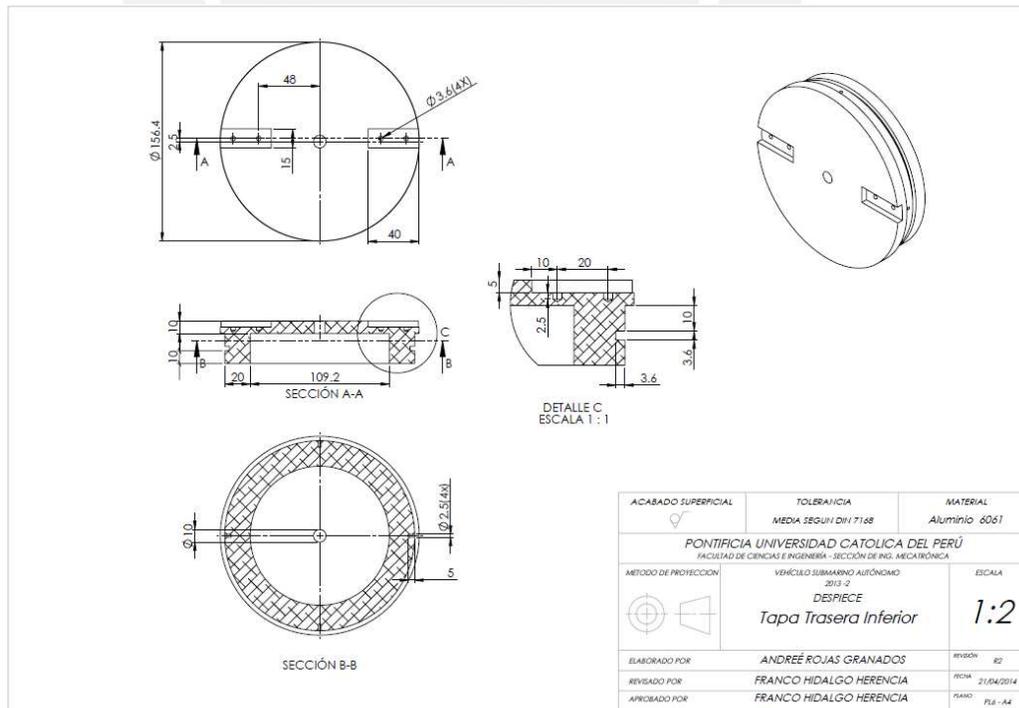


Figura 3.3.6: Plano de la tapa posterior de carcasa inferior

Unión tapa posterior superior

Esta pieza se encuentra dentro de la carcasa y cumple la función de permitir la unión entre la tapa posterior y la placa que contiene a las tarjetas. En la figura 3.3.7, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

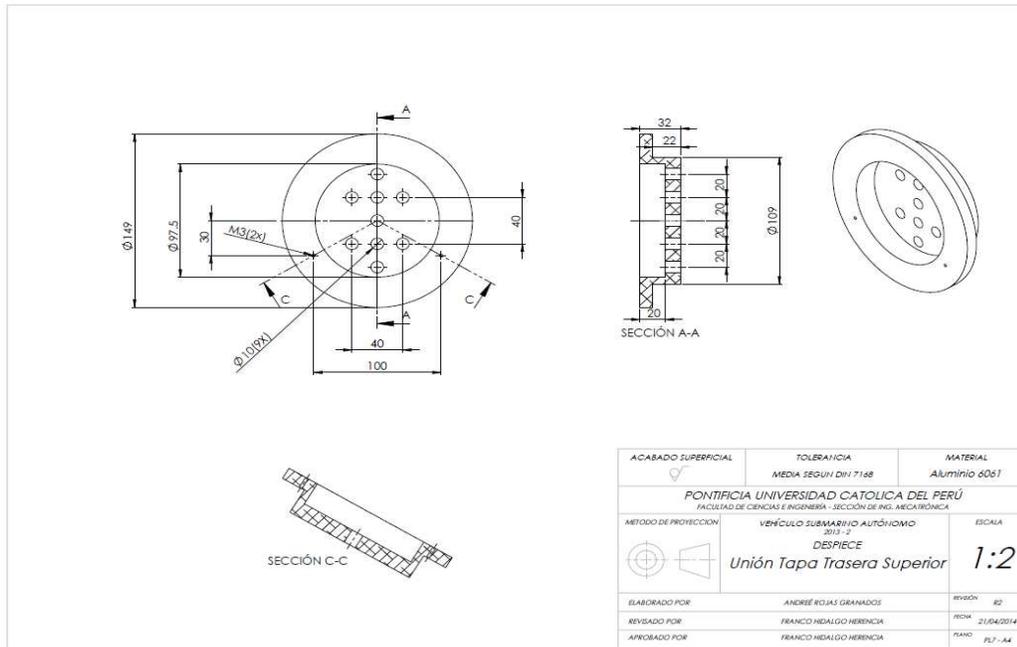


Figura 3.3.7: Plano de la unión de tapa posterior de carcasa superior

Unión tapa posterior inferior

Es similar a la pieza que se describió recientemente. Se diferencia en que se solo posee una cavidad para colocar a los conectores. En la figura 3.3.8, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

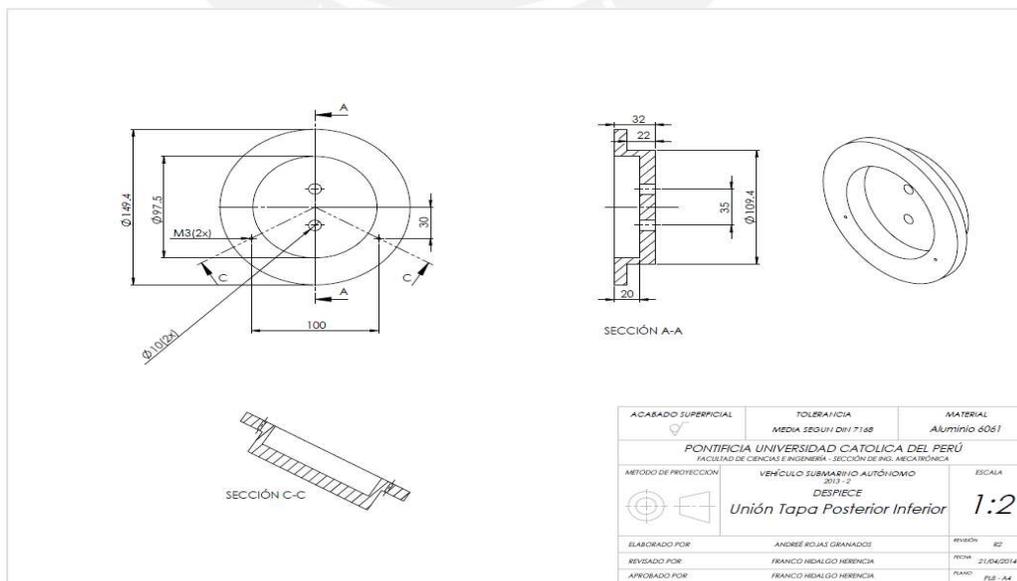


Figura 3.3.8: Plano de la unión de tapa posterior de carcasa inferior

Tubo

En las figuras 3.3.2 y 3.3.3, se puede observar que el tubo que forma parte de la carcasa del AUV. El tubo está hecho de aluminio 6061, el cual posee buena resistencia mecánica y baja densidad comparada con otros metales como el acero. Este material ha sido usado en AUV's anteriormente por [11] y [16] demostrando buenos resultados. El tubo deberá soportar la presión externa que el agua ejerce sobre el AUV a una profundidad máxima de 50m. En el anexo 3 se presentan los cálculos correspondientes a la Resistencia de Materiales, los cuales demuestran que el tubo con las dimensiones ilustradas soportará la presión máxima de 0.6 MPa, que corresponde a una profundidad de 50 m. En la figura también se puede observar algunos agujeros, los cuales sirven para unir al tubo con las tapas. En la figura 3.3.9, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

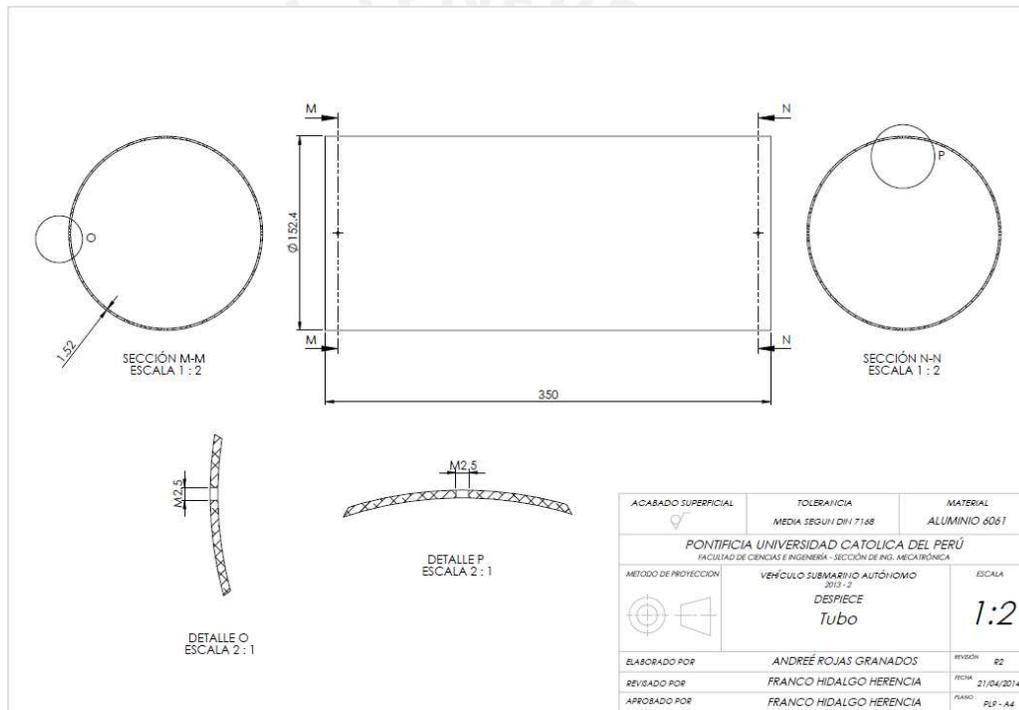


Figura 3.3.9: Plano del tubo de la carcasa

Placa para tarjetas

Es aquella que contiene a las tarjetas para el funcionamiento del AUV. Se procuró ubicar al IMU, de cierta forma que se encuentre en el centro del AUV, pues se recomienda que se encuentre en el centro para reducir el error de los datos del IMU [17]. También contiene los agujeros necesarios para asegurar el GPS, las tarjetas electrónicas y el controlador central. En la figura 3.3.10, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

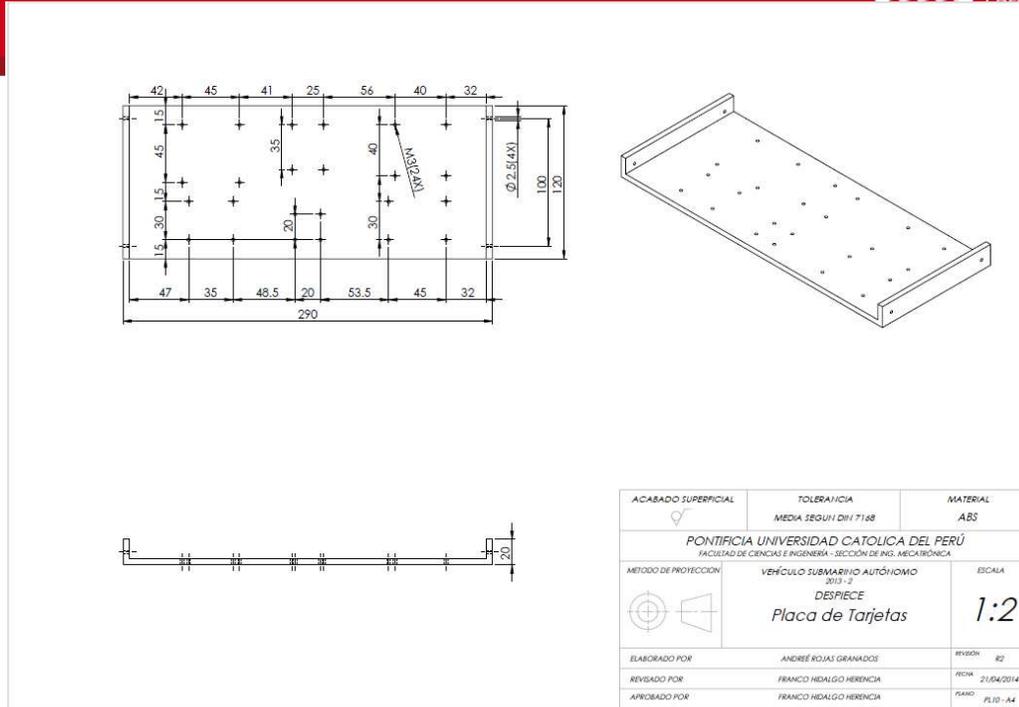


Figura 3.3.10: Plano de placa para tarjetas

Placa para baterías

Es aquella que contiene a las baterías dentro del AUV. Se diferencia del primer caso, en que esta placa contiene los agujeros necesarios para asegurar las baterías. Esta pieza y la anterior están hechas de plástico ABS. En la figura 3.3.11, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

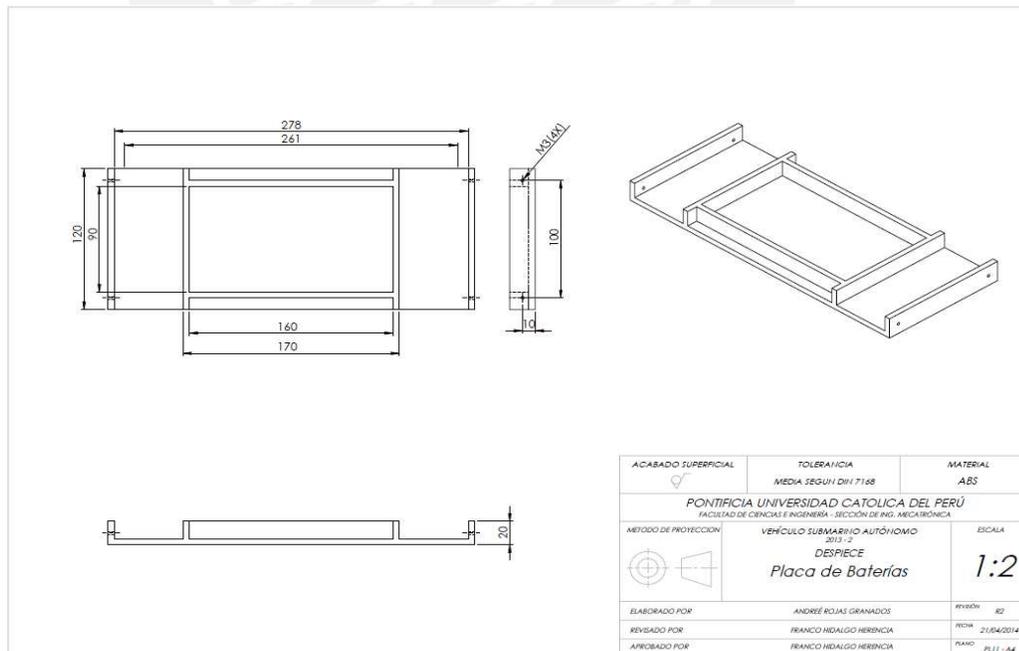


Figura 3.3.11: Plano de placa de baterías

Unión tapa delantera

De la misma manera que la unión de tapa trasera, esta pieza permite conectar a la tapa delantera con la placa que contiene a las tarjetas electrónicas. En la figura 3.3.12, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

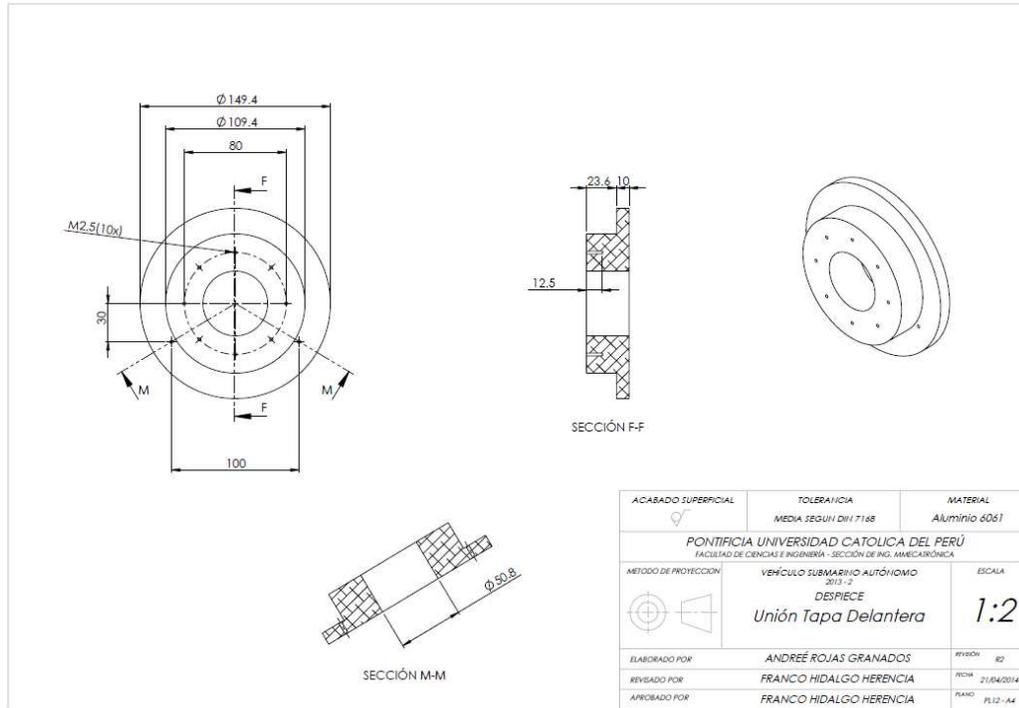


Figura 3.3.12: Plano de la unión de tapa delantera

Tapa delantera

Esta pieza no es en sí una tapa, pero permite la conexión entre el tubo y el visor semiesférico. A diferencia de la tapa trasera, esta pieza cuenta con dos cavidades para colocar O-rings. La primera se encuentra sobre la superficie cilíndrica de la tapa, de manera similar a la tapa posterior. Mientras que, la segunda se encuentra en la superficie plana que se encuentra en contacto con la superficie plana del visor semiesférico. En este caso, la presión sobre el O-ring se da entre las dos caras planas. Para mantener fija y presionada esta unión se cuenta con agujeros, tal que usando tornillos pueda ser unido al visor. Por otro lado, cuenta con un agujero en la parte central, que permite el paso de un cable a través del cual las cámaras puedan interactuar con el controlador central. Por último, cuenta con dos agujeros en la zona central para que se pueda unir el soporte de cámaras. En la figura 3.3.13, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

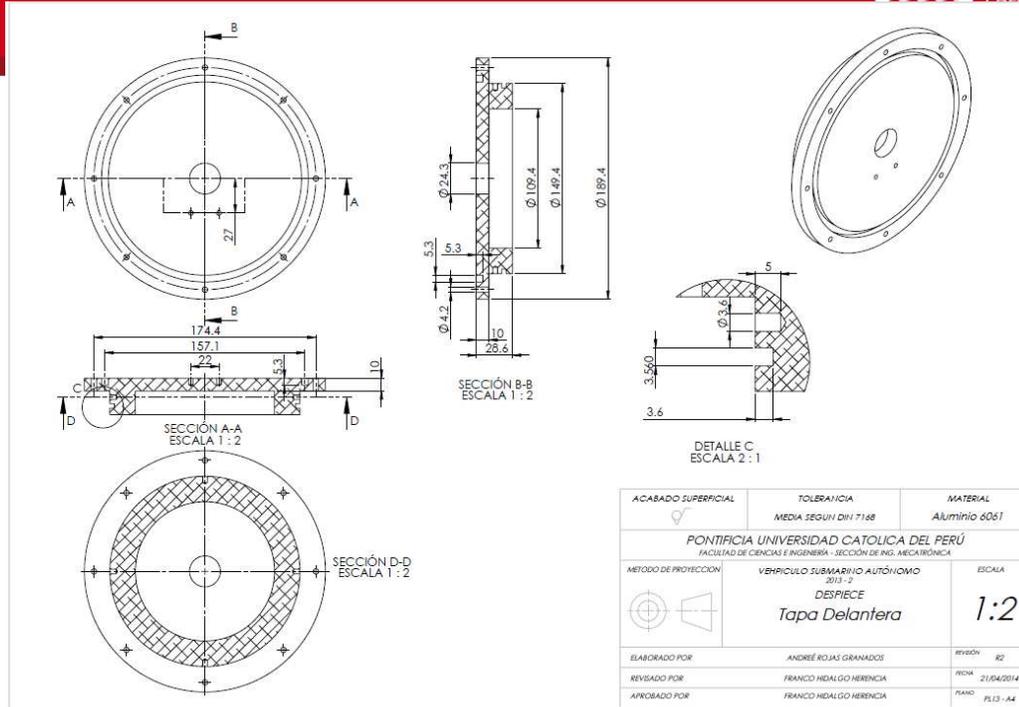


Figura 3.3.13: Plano de la tapa delantera

Visor

A través de este elemento, las cámaras, las cuales no están diseñadas para trabajar sumergidas en el agua, pueden adquirir las imágenes del exterior. Es por ello, que se utiliza un material transparente como el acrílico. En la figura 3.3.14, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

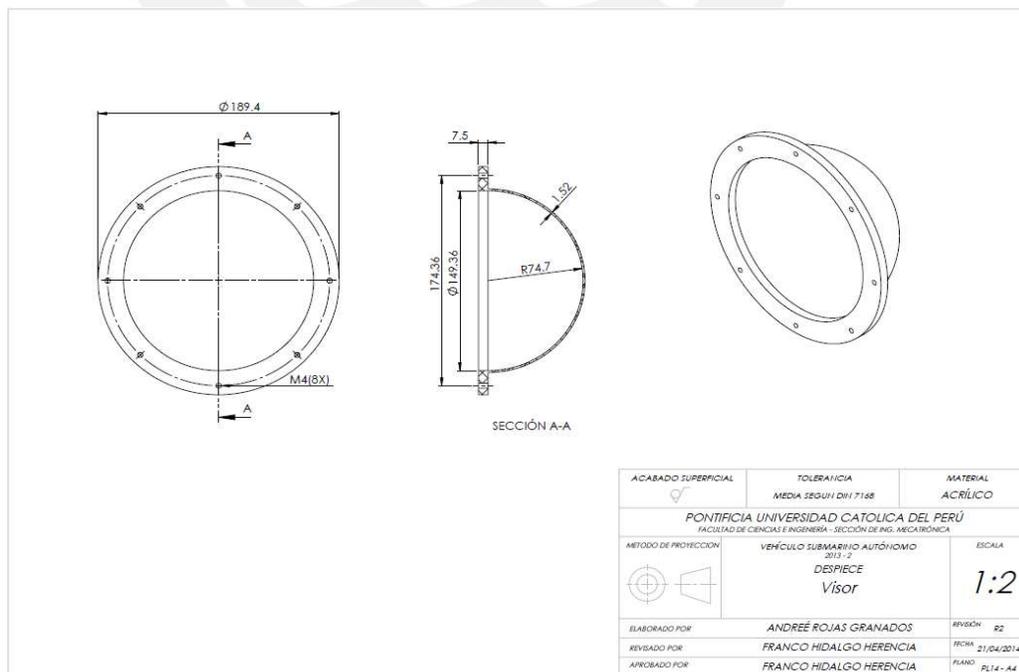


Figura 3.3.14: Plano del visor

Además, en [19], se recomienda el uso del acrílico para ser usado como visores en submarinos; el autor afirma que, respecto a otros materiales transparentes, el acrílico presenta mejores propiedades mecánicas y ópticas. Por otro lado, para este proyecto se decidió usar una forma semiesférica, pues esto le otorga una forma más hidrodinámica al AUV, y así se reduce el consumo de energía eléctrica por parte de los propulsores. Además, según [18], la forma semiesférica genera menos distorsiones que un visor plano debido a la refracción de la luz.

Soporte cámara

La figura 3.3.15, muestra la pieza diseñada para sostener a la cámara. La pieza está hecha de plástico ABS, puesto que no soporta grandes cargas ya que cada cámara pesa a penas 37 g. Para su diseño se tuvo en cuenta las medidas de la cámara escogida, las cuales son ofrecidas por el fabricante en su hoja de datos. Además, esta pieza contiene dos agujeros para que pueda ser unido mediante pernos a la tapa delantera.

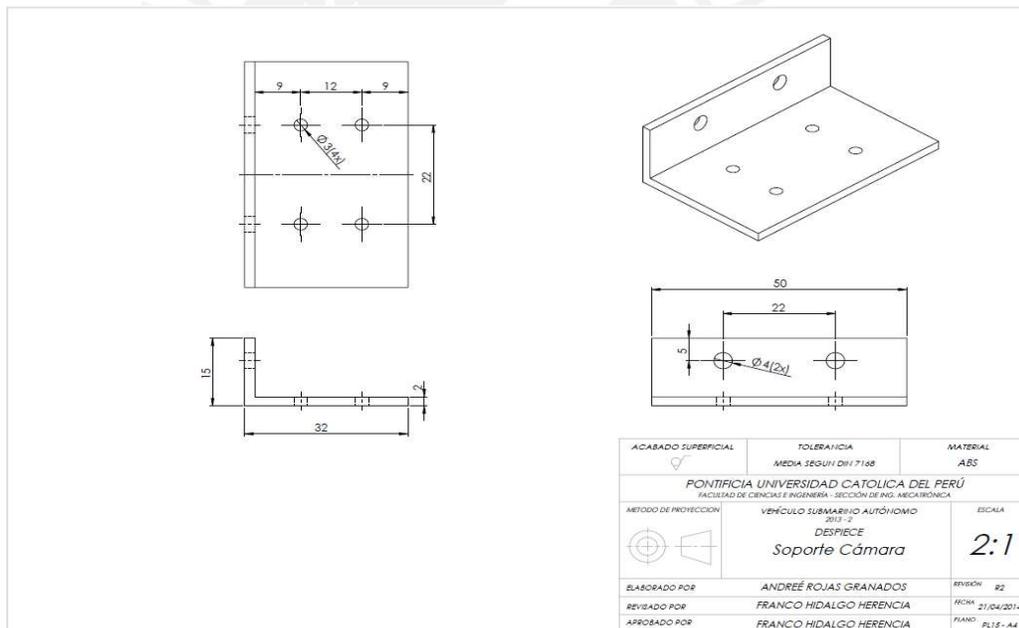


Figura 3.3.15: Plano del soporte de cámaras

Soporte Trasero

Esta pieza, sostiene a los propulsores que se encuentran en la parte posterior del AUV. En los extremos se pueden observar los agujeros necesarios para sostener a los propulsores. Los propulsores elegidos, cuentan con un soporte para ser unidos a otras piezas. En la hoja de datos del fabricante, se brinda las dimensiones del soporte así como también, las dimensiones de los agujeros para sujetarlo. Es de esta manera que se determinó las dimensiones de los agujeros de este soporte. Por otro lado, en la parte central cuenta con agujeros para unir esta pieza al soporte de tubos. Además, cuenta con los agujeros necesarios para sostener a la pieza que contenga al módem acústico. En la figura 3.3.16, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

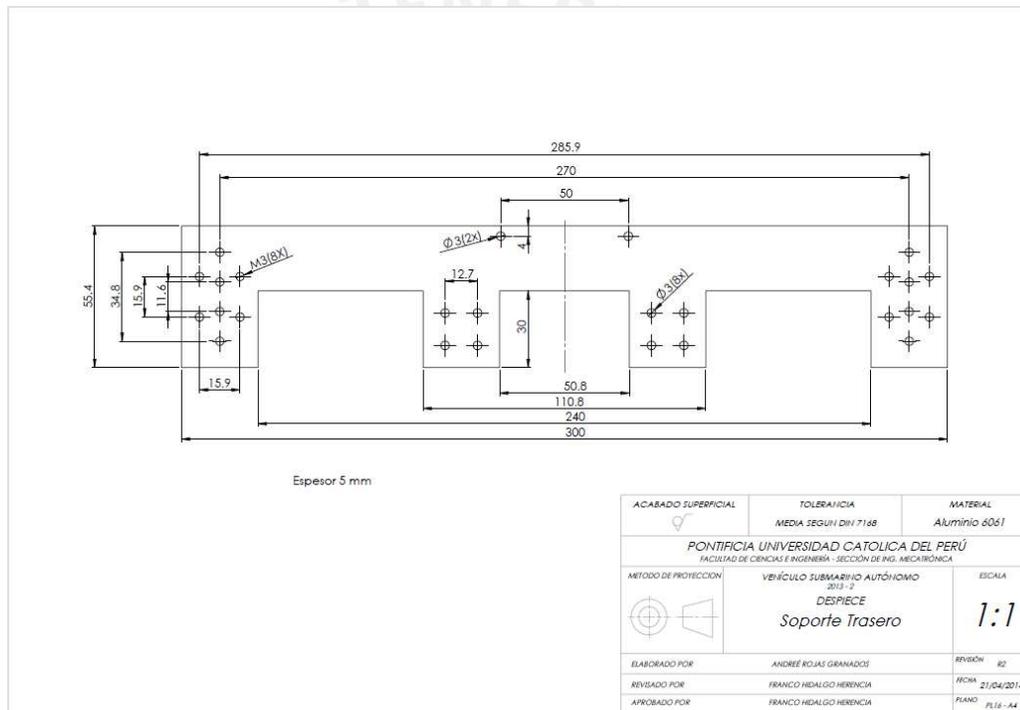


Figura 3.3.16: Plano del soporte trasero

Soporte central

Esta pieza cumple la función de sostener a los propulsores que se encuentran en la parte central. Los propulsores que este soporte sostiene son los que permiten el ascenso o descenso del AUV. Esta pieza es similar al soporte trasero, a diferencia que esta se encuentra orientada de forma vertical. Con esta orientación, se busca reducir los efectos de flexión que pueden ocasionar tanto el peso de los propulsores, así como también el empuje de estos. Esta pieza, también está hecha de aluminio, pues al igual que el soporte trasero soporta las cargas que ejerce los propulsores. Por otro lado, este soporte también cuenta con los agujeros necesarios

para hacer posible la unión de este soporte con la pieza que sostenga al sensor de presión. A diferencia del soporte trasero, esta pieza requiere de soldadura para tener una orientación que minimice los efectos de flexión y al mismo tiempo mantenga los propulsores orientados de forma vertical. En la figura 3.3.17, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

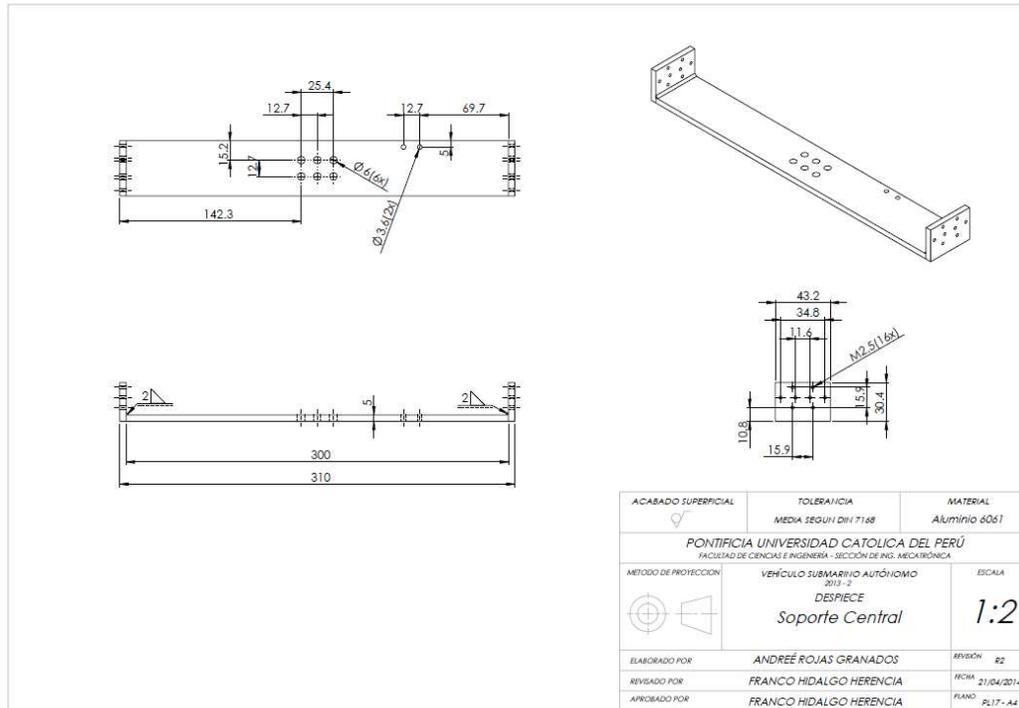


Figura 3.3.17: Plano del soporte central

Soporte delantero

Esta pieza es similar a los otros soportes descritos anteriormente. Aunque, en este caso el soporte no sostiene a ningún propulsor. En contraste, su función es sostener al soporte de tubos y al soporte de las lámparas LED. Para este proyecto se usa dos iluminaciones, por lo que se debe sostener a ambas a la estructura. En la figura 3.3.18, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

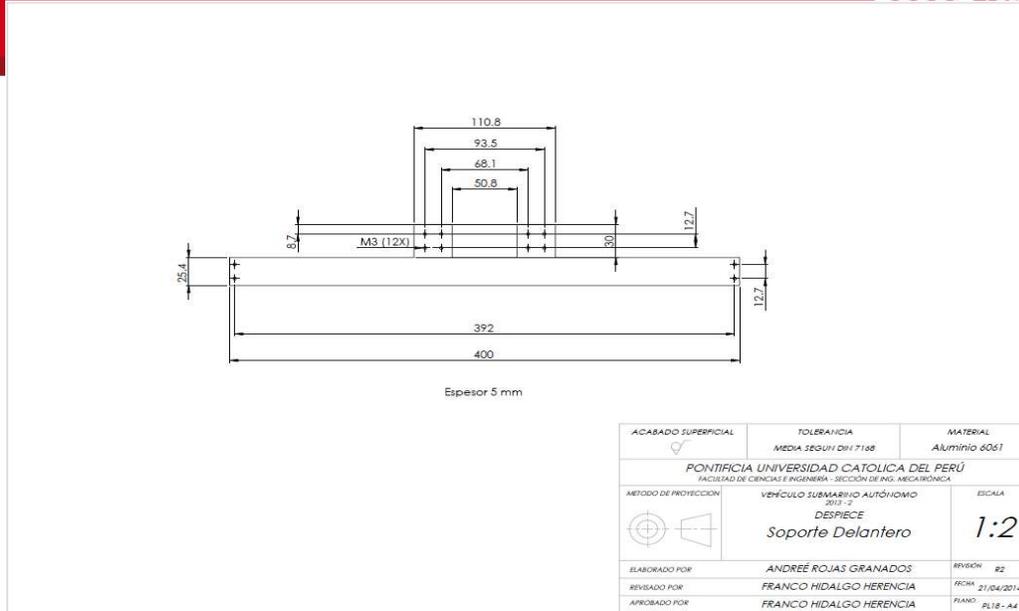


Figura 3.3.18: Plano del soporte delantero

Barra horizontal derecha

Como se mencionó anteriormente, se usan barras horizontales en los extremos de los soportes del AUV para unirlos y mantenerlos fijos. Esta barra fija las distancias a las que deben encontrarse los soportes de tubos del AUV. Además, está unida a la tapa posterior para la transmisión de movimiento. En la figura 3.3.19, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

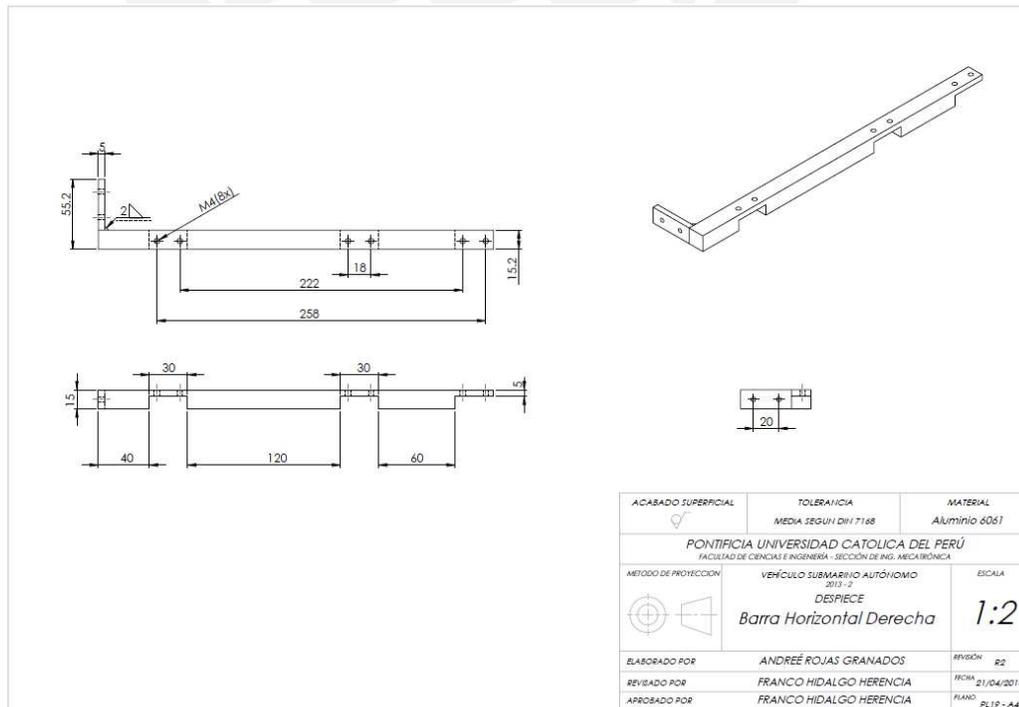


Figura 3.3.19: Plano de barra horizontal derecha

Como se puede observar en el plano, existe un cordón de soldadura. Esto debido, a que de esta manera se facilita la manufactura, pues de otro modo se tendría que mecanizar la pieza lo cual resultaría costoso.

Barra horizontal izquierda

Esta pieza es similar a la anterior, a diferencia que el cambio de perfil está orientado al lado opuesto. Al igual que la pieza Barra horizontal derecha, esta pieza también cuenta con un cordón de soldadura para el cambio de perfil. En la figura 3.3.20, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

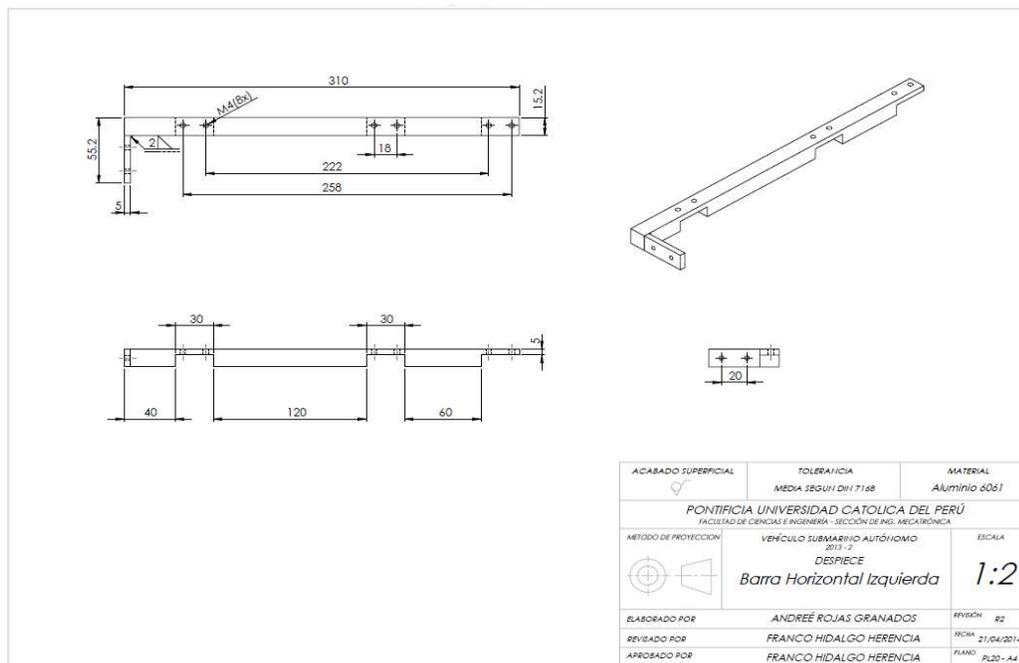


Figura 3.3.20: Plano de barra horizontal izquierda

Soporte de tubos posterior

Esta pieza tiene como objetivo mantener unidas a ambas carcasas. Además, transmite el movimiento de los propulsores a las carcasas. Esta pieza es de plástico ABS manufacturado por impresión 3D, ya que al utilizar el plástico se evita el fenómeno de corrosión. En la figura 3.3.21, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

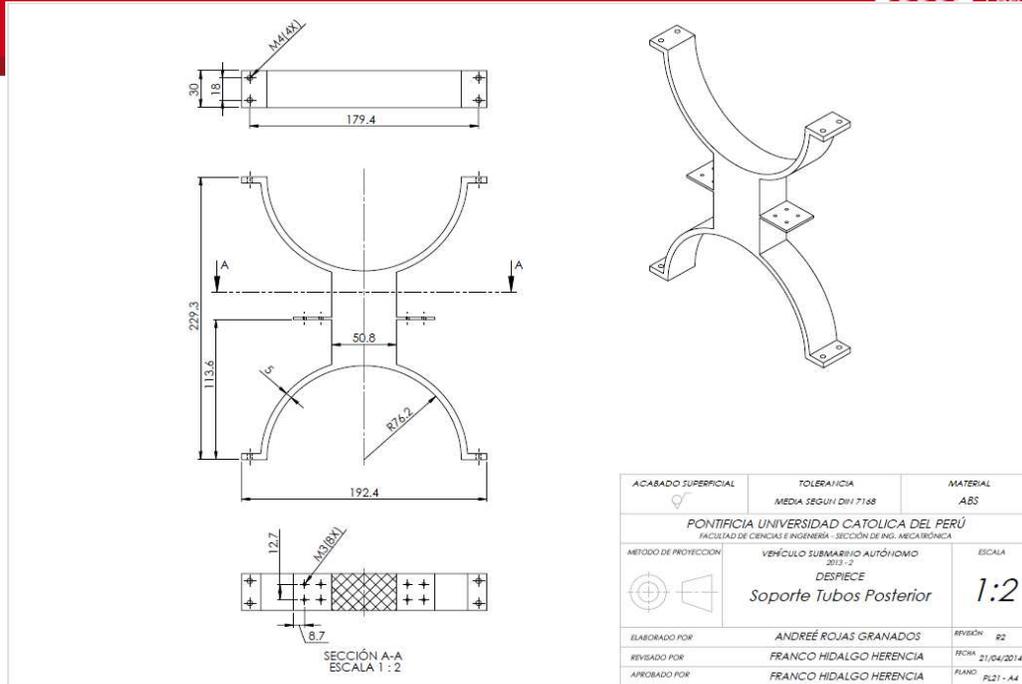


Figura 3.3.21: Plano del soporte de tubos posterior

Soporte de tubos central

Esta pieza cumple una función similar al soporte que se encuentra en la parte trasera. Pues también, debe cumplir la función de unir a los tubos y transmitir el movimiento de los propulsores. Sin embargo, se diferencia de esta, en la forma en la que se une al soporte central que sostiene a los propulsores. En este caso, la unión se da mediante tornillos que atraviesan al soporte de forma transversal. Al igual que el soporte de tubos trasero, también es fabricado en ABS a través de impresión 3D, ya que es complicado fabricar esta pieza por otros métodos. En la figura 3.3.22, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

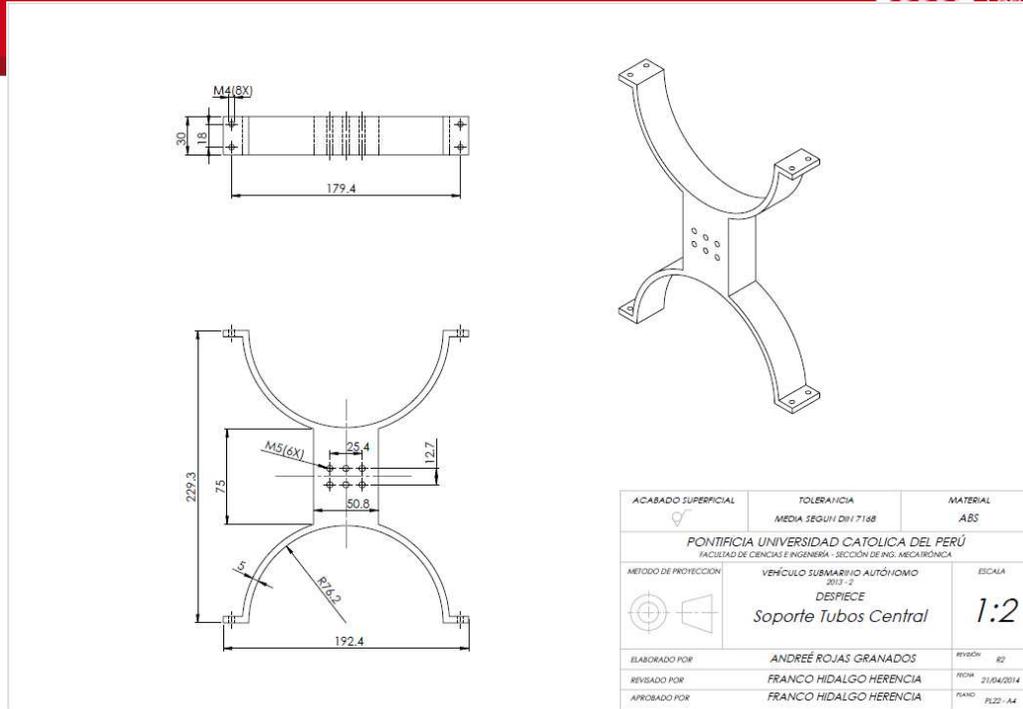


Figura 3.3.22: Plano del soporte de tubos central

Cierra tubos

Esta pieza se une a los soportes de tubos para sostener a las carcasas. En la figura 3.3.23, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

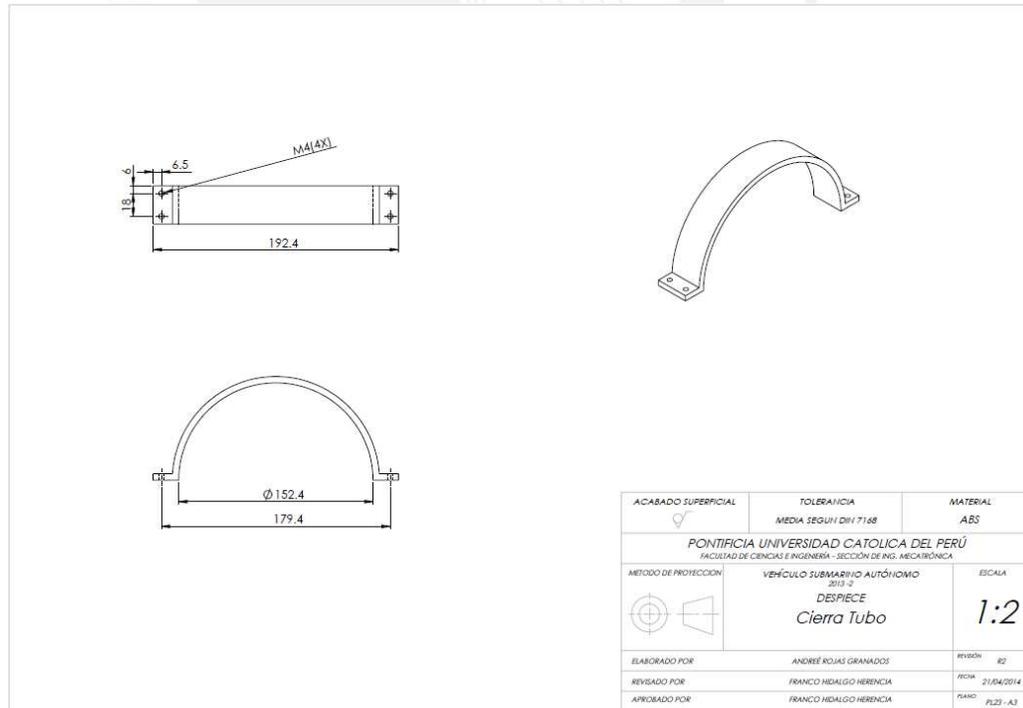


Figura 3.3.23: Plano del soporte de tubos central

Soporte de modem

La siguiente pieza, cumple la función de soportar al módem acústico. Esto se debe a que, este dispositivo puede operar totalmente en agua, por lo cual permanece fuera de la carcasa. El fabricante brinda en las hojas de datos del producto sus dimensiones, lo cual ayudó en el diseño de esta pieza. Este soporte se une a la pieza anterior, el soporte trasero, a través de pernos que son ubicados en los agujeros que se encuentran al extremo de la parte central del soporte trasero. En la figura 3.3.24, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

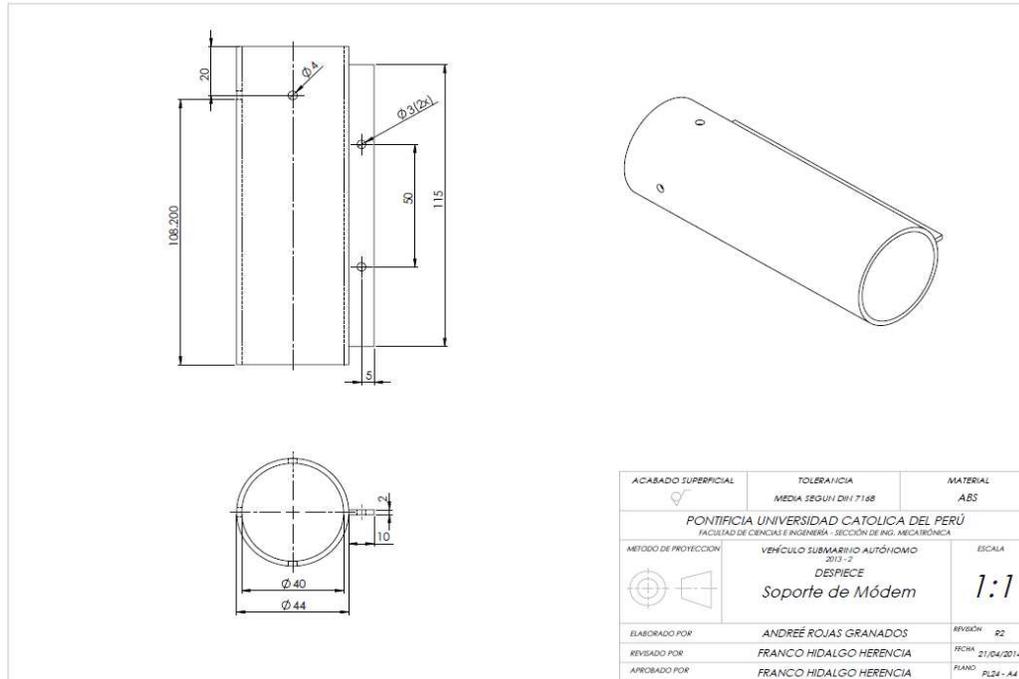


Figura 3.3.24: Plano del soporte de módem

Soporte de sensor de presión

Se mencionó anteriormente que se requiere de un sensor de presión que permita estimar la profundidad a la que se encuentra el AUV. Dado que se debe medir la presión externa, este elemento se debe encontrar fuera de las carcasas. Es por ello, que se requiere un elemento que lo sostenga y lo mantenga unido al resto del AUV. En la hoja de datos del producto, se encuentran las dimensiones del sensor, a partir de las cuales se diseñó este soporte. En la figura 3.3.25, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

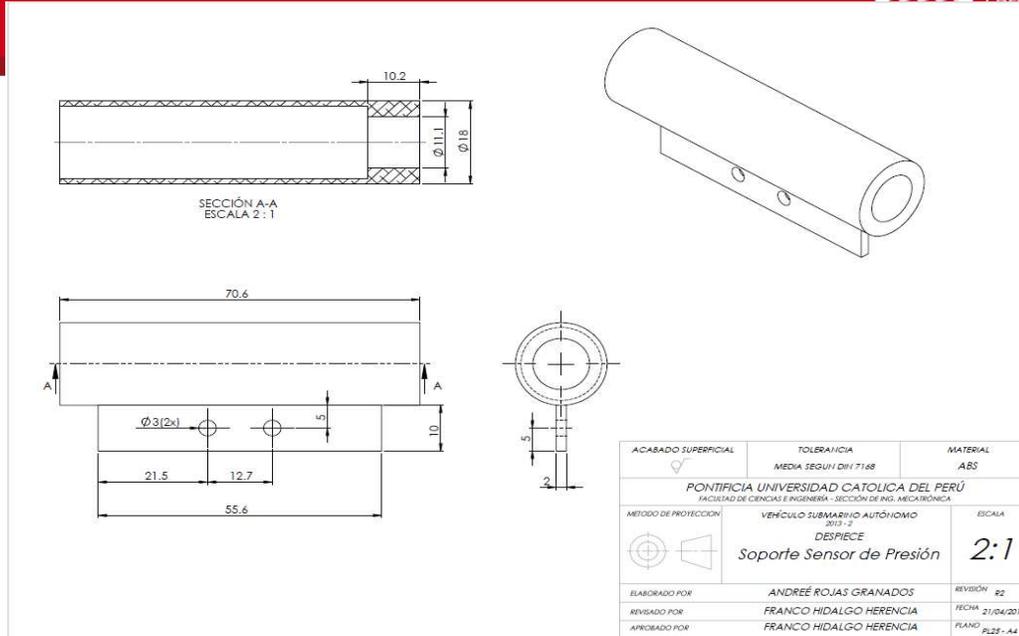


Figura 3.3.25: Plano del soporte del sensor de presión

Soporte de iluminación

Para permitir el adecuado procesamiento de imágenes, el AUV requiere de iluminación artificial. La iluminación elegida, está diseñada para operar completamente sumergida. Por este motivo, es necesaria una pieza que soporte a la iluminación. En la figura 3.3.26, se muestra el plano correspondiente a esta pieza.

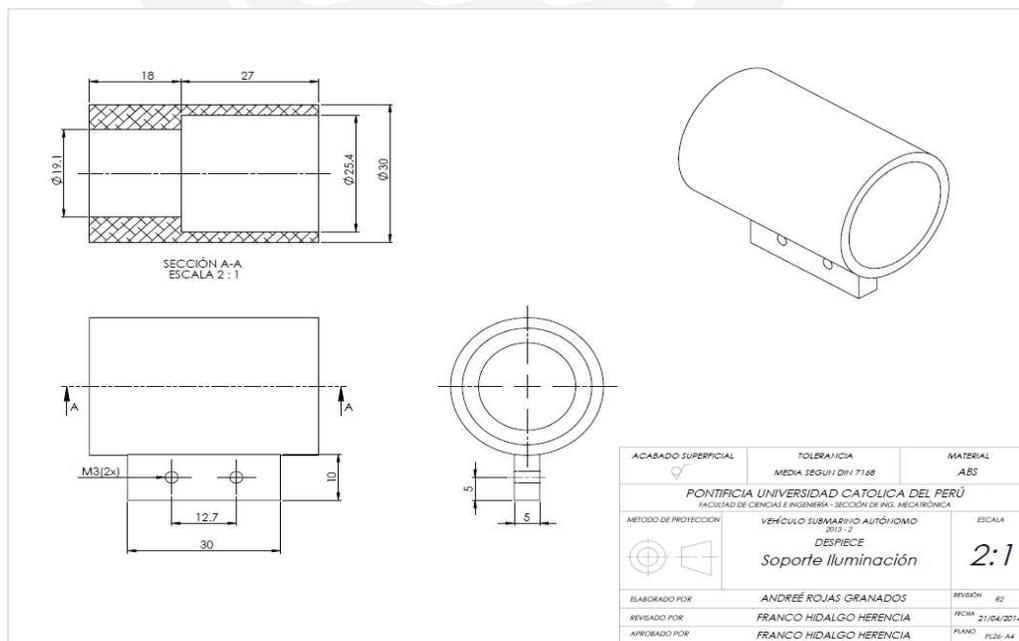


Figura 3.3.26: Plano del soporte de iluminación

3.4 Diagramas esquemáticos de los circuitos del sistema mecatrónico

3.4.1 BeagleBone- Black

Como se mencionó anteriormente, el controlador central del sistema debe interactuar con los demás subsistemas. Debe realizar la comunicación con la base, realizar el procesamiento de imágenes y controlar el movimiento del AUV. Debido a estos requerimientos se selecciona la computadora embebida BeagleBone Black. Esta es una computadora de USD 45 que está basado en un procesador ARM Sitara AM335x Cortex A8 de Texas Instruments y cuenta con una frecuencia de reloj de 1 GHz. Además, cuenta con 2 puertos USB 2.0 (1 Host USB port y 1 Client USB port), 1 puerto Ethernet, 4 UART, 8 PWM, 7 pines análogos, 2 buses CAN entre otros. A continuación, se muestra una gráfica que ilustra al BeagleBone Black.

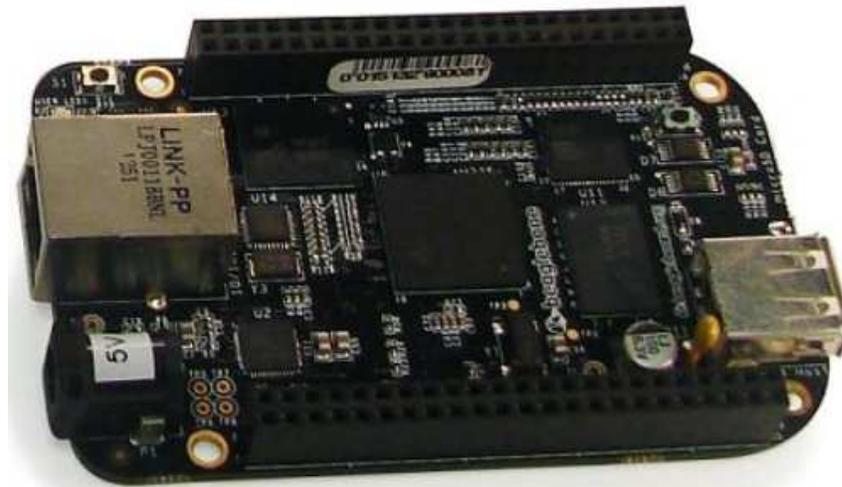


Figura 3.4.1: BeagleBone Black

El BeagleBone Black pertenece a la familia de BeagleBone.org, un proyecto de fuente abierta para el desarrollo de sistemas embebidos de bajo precio [20]. Esta familia de sistemas embebidos ha sido usada en numerosos proyectos por la comunidad científica. Es más, ha sido usada en el desarrollo de OpenROV, un proyecto de fuente abierta para el desarrollo de un ROV (Remote Operated Vehicle), los cuales también operan bajo el agua al igual que los AUV, a diferencia que no son autónomos. Además, la universidad estadounidense FAMU-FSU (Florida A&M University – Florida State University) ha usado esta familia de tarjetas para el desarrollo de un AUV [21]. Se decidió elegir esta tarjeta pues se posee buenas referencias sobre su uso, además ha sido usado para obtener imágenes estereoscópicas al igual que en este proyecto. En la tabla 3.4.1, se detalla las características del BeagleBone Black.

	Feature	
Processor	Sitara AM3359AZCZ100	
Graphics Engine	1GHz, 2000 MIPS	
SDRAM Memory	SGX530 3D, 20M Polygons/S	
Onboard Flash	512MB DDR3L 800MHZ	
PMIC	2GB, 8bit Embedded MMC	
Debug Support	TPS65217C PMIC regulator and one additional LDO.	
Power Source	Optional Onboard 20-pin CTI JTAG, Serial Header	
PCB	miniUSB USB or DC Jack	5VDC External Via Expansion Header
Indicators	3.4" x 2.1"	6 layers
HS USB 2.0 Client Port	1-Power, 2-Ethernet, 4-User Controllable LEDs	
HS USB 2.0 Host Port	Access to USB0, Client mode via miniUSB	
Serial Port	Access to USB1, Type A Socket, 500mA LS/FS/HS	
Ethernet	UART0 access via 6 pin 3.3V TTL Header. Header is populated	
SD/MMC Connector	10/100, RJ45	
User Input	microSD , 3.3V	
Video Out	Reset Button Boot Button Power Button	
Audio	16b HDMI, 1280x1024 (MAX) 1024x768, 1280x720, 1440x900 , 1920x1080 @24Hz w/EDID Support	
Expansion Connectors	Via HDMI Interface, Stereo Power 5V, 3.3V , VDD_ADC(1.8V) 3.3V I/O on all signals McASP0, SPI1, I2C, GPIO(69 max), LCD, GPMC, MMC1, MMC2, 7 AIN(1.8V MAX), 4 Timers, 4 Serial Ports, CAN0, EHRPWM(0,2), XDMA Interrupt, Power button, Expansion Board ID (Up to 4 can be stacked)	
Weight	1.4 oz (39.68 grams)	
Power	Refer to Section 6.1.7	

Tabla 3.4.1: Características del BeagleBone Black

Para el AUV se usará el puerto USB, una entrada analógica, 3 puertos UART, 6 salidas PWM (2 para el control de la iluminación y 4 para el control de velocidad de los propulsores),

Circuito de distribución de energía

En la figura 3.4.2, se observa el diagrama esquemático correspondiente a la distribución de energía desde las baterías al resto del sistema. Se usa dos paquetes de baterías: uno de 22.2 V y otro de 14.8 V. El primero será para energizar a los propulsores, a las lámparas LED; mientras que el segundo paquete es para energizar a los sensores, al módem acústico y a las demás tarjetas electrónicas.

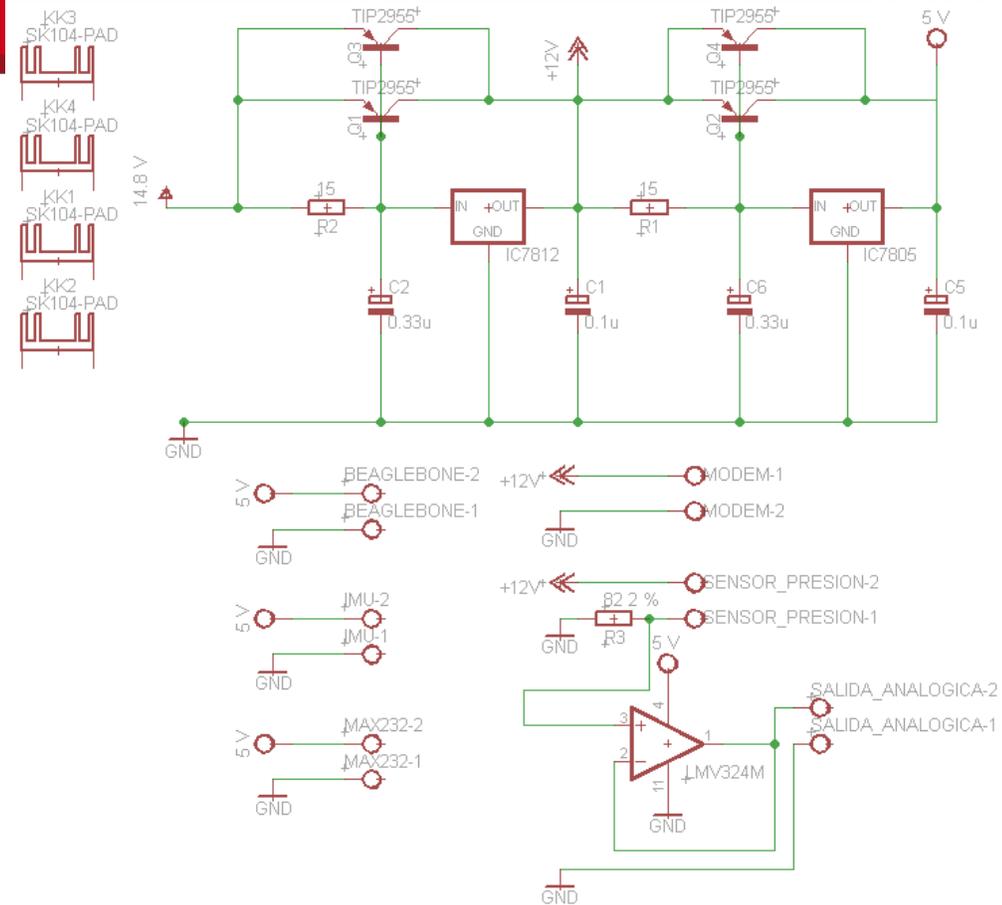


Figura 3.4.2 Esquemático correspondiente a la regulación de voltaje para alimentación

Cabe mencionar que en el esquemático mostrado, no se observa a las conexiones de la batería de 22.2 V, esto debido a que para este paquete de baterías no se realiza ninguna regulación de voltaje, conectándose los terminales de la batería de manera directa.

Por otro lado, como se puede observar en el esquemático, se usa los circuitos integrados LM7812 Y LM7805 para la regulación de voltaje. Si bien es cierto, los reguladores lineales, como los integrados LM7812 y LM7805, son menos eficientes que los reguladores conmutados, la potencia consumida por los elementos que son alimentados por este circuito representa un porcentaje muy pequeño del total de potencia consumida por el sistema, como se puede observar en el anexo 4. Por otro lado, en la hoja de datos del LM7805 y del LM7812, se indica que la corriente máxima que puede circular por ellos es 2.2 A; sin embargo para alimentar a todos los sensores, en el peor de los casos se consumen aproximadamente 4 A, como se puede observar en la figura 3.4.3.

Dispositivos de 5 V	Corriente (mA)
IMU	96
Beaglebone	1000
Cámara (2x)	800
Subtotal	1896
Dispositivos de 12 V	Corriente (mA)
Sensor de presión	20
Módem acústico	2000
Subtotal	2020
	Corriente (mA)
Dispositivos de 5V	2020
Dispositivos de 12V	1896
Total	3916

Figura 3.4.3: Tablas que ilustran el consumo de corriente

Por este motivo, se colocan transistores PNP en paralelo, a través de los cuales circulará el exceso de corriente. Existe una resistencia a la entrada a cada circuito integrado, que está conectada a los terminales base - emisor de cada transistor, la cual define la corriente máxima que circulará por cada integrado. Al circular la corriente por la resistencia, se genera una diferencia de potencial entre los terminales base y emisor del transistor. Cuando la corriente exceda el valor límite, la diferencia de potencial entre sus extremos activará al transistor y estará en estado de saturación. En el Anexo 4, se presentan los cálculos eléctricos correspondientes, cálculo de potencia y determinación de la temperatura de los circuitos integrados.

Por otro lado, dado que el sensor de presión opera en un lazo de corriente, la corriente no puede ser leída por el pin análogo del controlador, pues este sólo puede leer niveles análogos de voltaje. Por este motivo, se incorpora una resistencia en serie dentro del lazo de corriente y se coloca un seguidor de voltaje entre los terminales de la resistencia para acondicionar la señal que recibe el BeagleBone. Al circular corriente por la resistencia, se genera una diferencia de potencial entre sus terminales y el voltaje en sus extremos es dirigido hacia el seguidor de voltaje, y la salida de este se envía a la entrada analógica del controlador. Se utiliza una resistencia de 2% de tolerancia en vez de usar las de propósito general con tolerancias de 5% para que las medidas que reciba el controlador sean más precisas. Por último, se puede observar un conector para alimentar a la tarjeta interfaz de RS232/TTL, la cual será descrita más adelante.

En la figura 3.4.4, se observa el diagrama de distribución de energía.

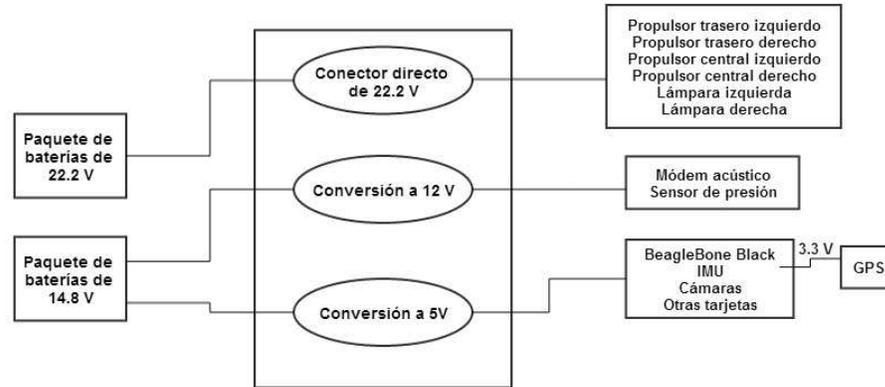


Figura 3.4.4: Diagrama de bloques de la distribución de energía en el sistema mecatrónico

Como se puede observar en la figura anterior, se puede ofrecer 22.2 V, 12 V y 5V. El voltaje de 22.2 es ofrecido a los propulsores y lámparas de forma directa de parte de las baterías, es decir no es necesario regular el voltaje. Mientras que, el de 12 V se usa para energizar al módem acústico y al sensor de presión. Y por último, el voltaje de 5V es usado para energizar al BeagleBone Black, al IMU y a las cámaras. Si bien es cierto, la comunicación entre el BeagleBone y las cámaras se realiza a través del puerto USB, su alimentación se realiza a través de los pines genéricos de la cámara, puesto que la cámara consume más corriente que la que puede otorgar el BeagleBone por su puerto USB.

Circuito de interfaz RS-232 - TTL

Tanto el IMU, el receptor GPS y el módem acústico interactúan con el BeagleBone usando comunicación serial. Sin embargo, el módem acústico usa interfaz RS-232, mientras que el BeagleBone Black, el IMU y el GPS operan bajo niveles TTL, por lo que se debe realizar la conversión de niveles para posibilitar la comunicación. La forma más común de hacerlo es usando el circuito integrado MAX232. En la figura 3.4.5, se observa el esquemático para hacer posible la comunicación entre el módem que posee un conector DB9 y el BeagleBone.

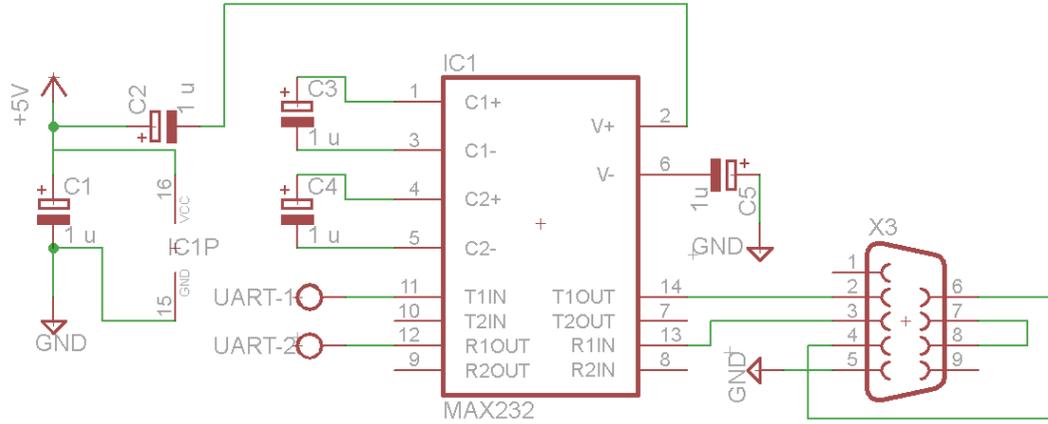


Figura 3.4.5: Esquemático de interfaz RS232/TTL

Cabe agregar que este circuito es el que recomienda el fabricante del integrado MAX232 en su hoja de datos.

Circuito de control de iluminación

A diferencia, de los propulsores, los cuales cuentan con los ESC (Electronic Speed Controller) para controlar su velocidad a través de señales PWM (Pulse Width Moduled), las lámparas no cuentan con un circuito para controlar su iluminación, así como también su encendido y apagado. En la figura 3.4.6, se muestra el circuito propuesto para controlar la iluminación.

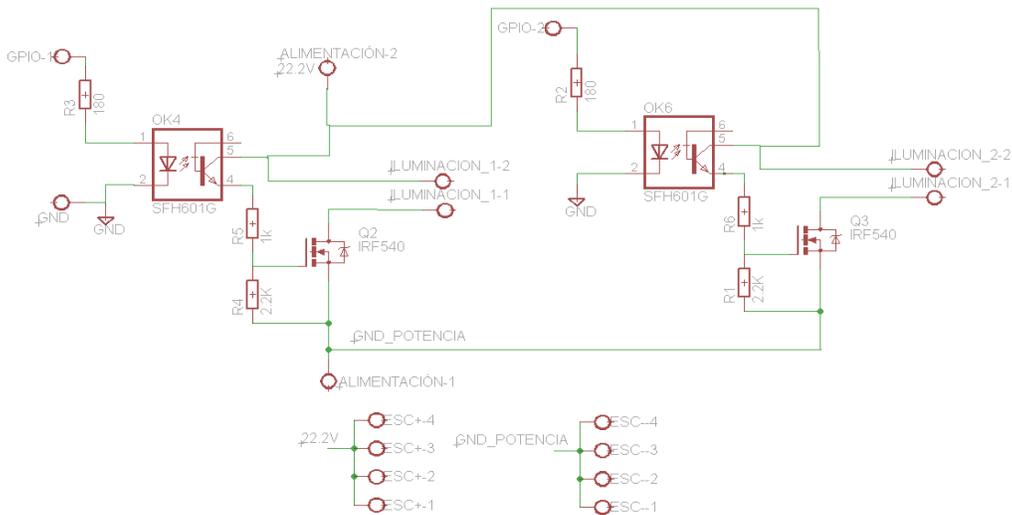


Figura 3.4.6: Diagrama esquemático para el control de la iluminación y alimentación para los ESC

Si la señal que ingresa al optoacoplador enciende el LED interno, el transistor a la salida del optoacoplador se satura y la diferencia de potencial entre colector y emisor es aproximadamente 0 V. Entonces, el voltaje de emisor en cada optoacoplador es igual a 22.2 V. Luego, hay un divisor de voltaje en cuya salida se

encuentra el gate del mosfet canal N, el cual tiene una impedancia de entrada muy grande por lo que se considera que el flujo de corriente circula solo por las resistencias. Se usa el divisor de voltaje, porque el valor máximo de voltaje de gate – source es 20V, y con el divisor de voltaje el valor de voltaje gate – source es aproximadamente 15 V, con lo cual el mosfet se satura permitiendo el flujo de corriente en el colector y encendiendo así la iluminación. Por el contrario, en el caso en el que la entrada al optoacoplador no encienda el LED interno, el transistor a la salida se encuentra en zona de corte. Al estar el transistor en corte, la corriente colector – emisor es nula, por lo que el voltaje gate – source es 0, con lo que el transistor se bloquea e impide el flujo de corriente por el colector, apagando así la iluminación. Mediante este circuito se puede controlar su encendido y apagado así como también, la intensidad de la iluminación. De esta forma, mediante señales PWM, se puede controlar la intensidad de iluminación de las lámparas. Por último, se cuenta con un disipador, para evitar el sobrecalentamiento del MOSFET, que es por el cual circula la corriente más alta. Los cálculos correspondientes se encuentran en el anexo 4. Cabe mencionar que en esta tarjeta se encuentran los conectores para alimentar a los ESC.

En la figura 3.4.7, se presenta el diagrama de conexiones de todo el sistema.

Diagrama de conexiones del sistema en general

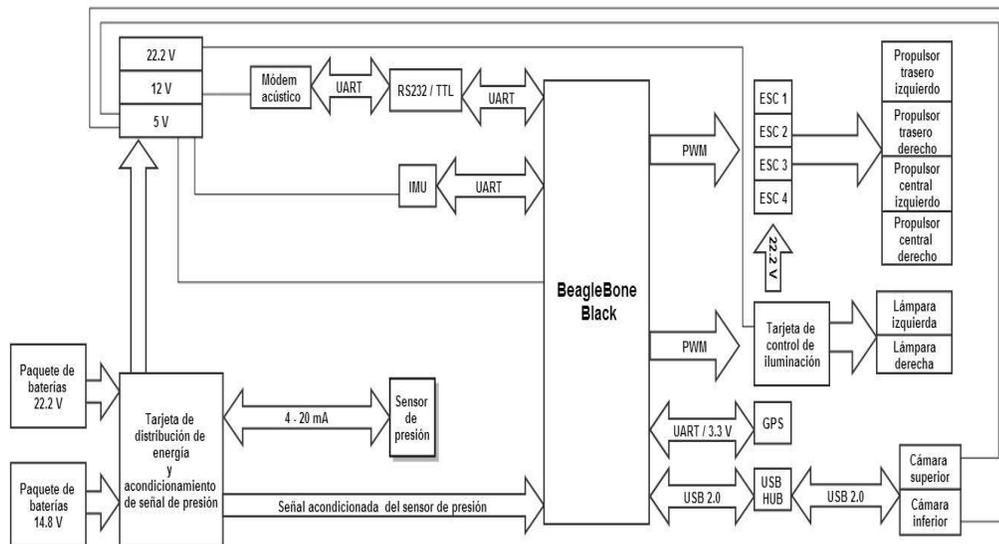


Figura 3.4.7 Diagrama de conexiones de todo el sistema

3.5 Diagrama de flujo del programa de control

Diagrama general de flujo del programa de control

En la figura 3.5.1, se muestra el diagrama de flujo general del programa de control. Los bloques que requieran más detalle serán explicados más adelante.

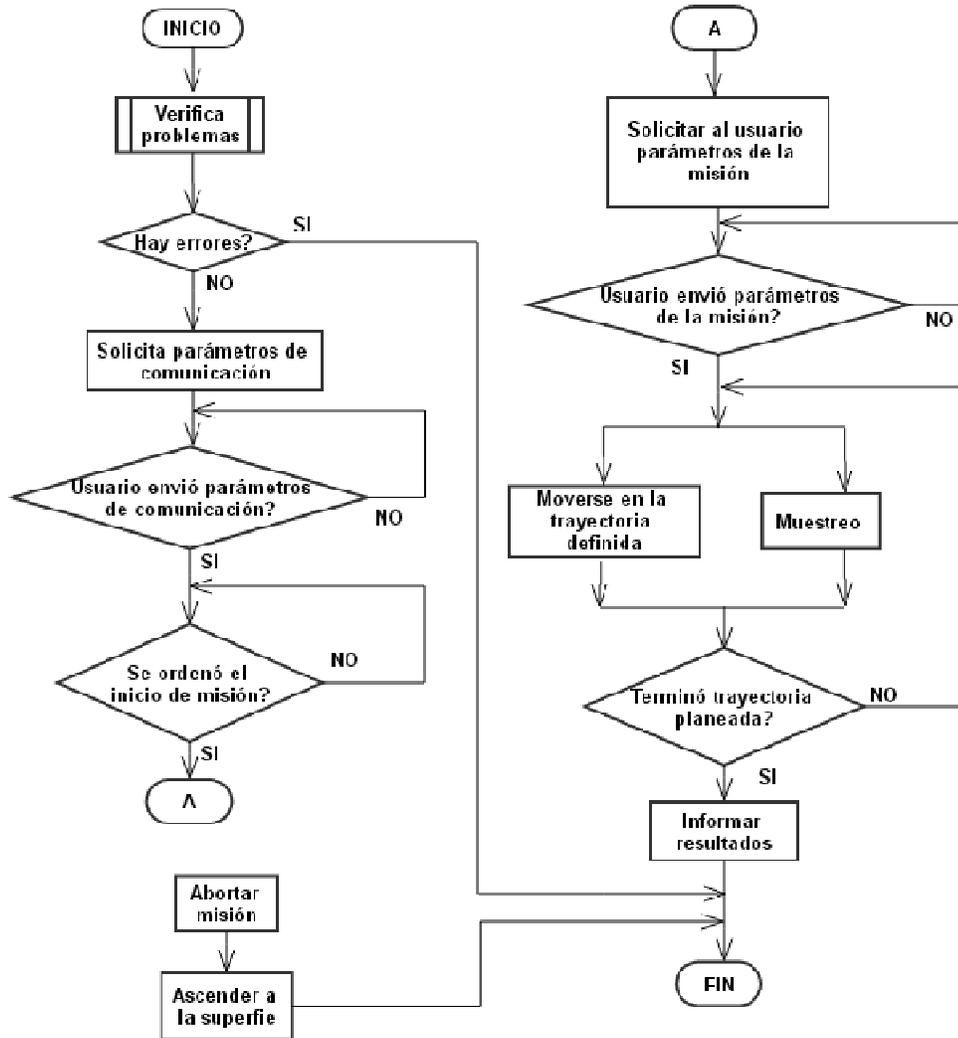


Figura 3.5.1 Diagrama general de flujo del programa de control

El sistema de control empieza al conectar la fuente de voltaje de 5V que alimenta al BeagleBone. Luego, de esto el controlador verifica que puede recibir información de parte de los sensores. Si todo estuviese correcto envía una señal al usuario indicándole que está listo para comenzar, por el contrario, si existiese algún inconveniente no envía ninguna señal, por lo que el usuario ante la ausencia de la señal debe inspeccionar y hallar el error para poder comenzar. Después, espera a que el usuario le indique, a través de la comunicación por el módem acústico, que

se inicia la misión. Esto debido a que el AUV puede ser energizado fuera del agua pero no puede empezar su misión hasta que no se encuentre en el agua, puesto que los propulsores se dañarían ya que el fabricante recomienda que solo operen bajo el agua. Al recibir esta indicación, el AUV consulta al usuario los parámetros de la misión, tales como el diámetro y la profundidad de la red de pesca, con el fin de definir los parámetros de su trayectoria. Al obtener la respuesta del usuario, se empieza a mover para cumplir con su trayectoria. De forma paralela, realiza el muestreo estadístico para determinar la talla de los peces. Al culminar, su trayectoria informa a la base sus resultados y su posición para que pueda ser recogido. Cabe señalar, que en cualquier momento el usuario podría indicar al AUV que se aborte la misión, por lo que si ese fuera el caso, el AUV debe ascender a la superficie y terminar su programa de control.

Diagrama de flujo del bloque de verificación de problemas

En la figura 3.5.2, se puede observar el diagrama correspondiente a la detección de errores antes de empezar la misión del AUV. Como se puede observar, si hubiese un solo error el proceso se detiene y se informa al usuario que existe un error.

En primer lugar se verifica el funcionamiento de los sensores. Primero, se envía señales, a través del puerto UART, al IMU. Si se puede interactuar con el sensor sin problemas, se continúa. Luego, se pide la posición del AUV al receptor GPS, también a través de la interfaz UART. Si es que se recibe la posición sin problemas se continúa. Después, se lee la salida correspondiente al sensor de presión. Esta señal es leída por un pin analógico del BeagleBone. Si la presión leída es aproximadamente 1 atm se continúa, pues esa presión es la que corresponde al estar al nivel del mar. Después, se adquiere imágenes de ambas cámaras. Esta interacción se realiza a través del puerto USB 2.0 del BeagleBone. Si no hubo problemas en la adquisición de imágenes se continúa.

Por otro lado, también se verifica que los actuadores funcionan correctamente. Primero se verifica que las iluminaciones se pueden prender, apagar y ser controladas por el BeagleBone. Para controlar la intensidad de la iluminación, se usan señales PWM. Si no hubiera, algún inconveniente se continúa.

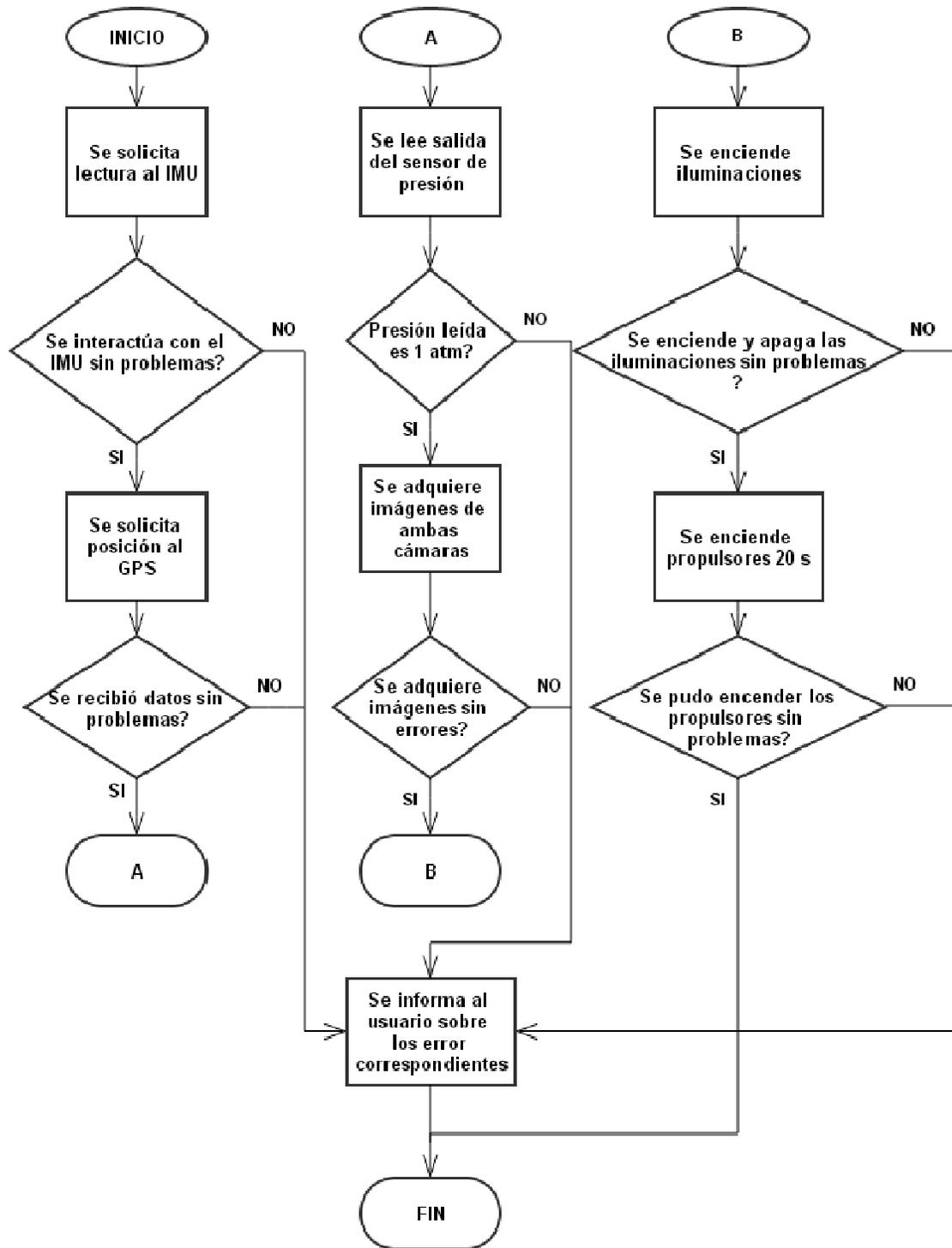


Figura 3.5.2 Diagrama general de flujo del programa de control

Por último, se verifica el funcionamiento de los propulsores. Para ello se controla su encendido, apagado y velocidad. Sin embargo, esta verificación solo debe durar como máximo 30 segundos. Esto debido a que el fabricante, recomienda que sean operados fuera del agua solo esa cantidad de tiempo.

Control de Movimiento

Realizar el control de movimiento para el AUV usando técnicas clásicas como un controlador PI o PID resulta complicado pues existe una alta no-linealidad [22]. Además, es complicado realizar el modelamiento matemático para hallar la función de transferencia del sistema. Es por ello que se recurre a una técnica moderna de control como Lógica Difusa. En la siguiente figura se muestra el diagrama correspondiente al proceso de control difuso.

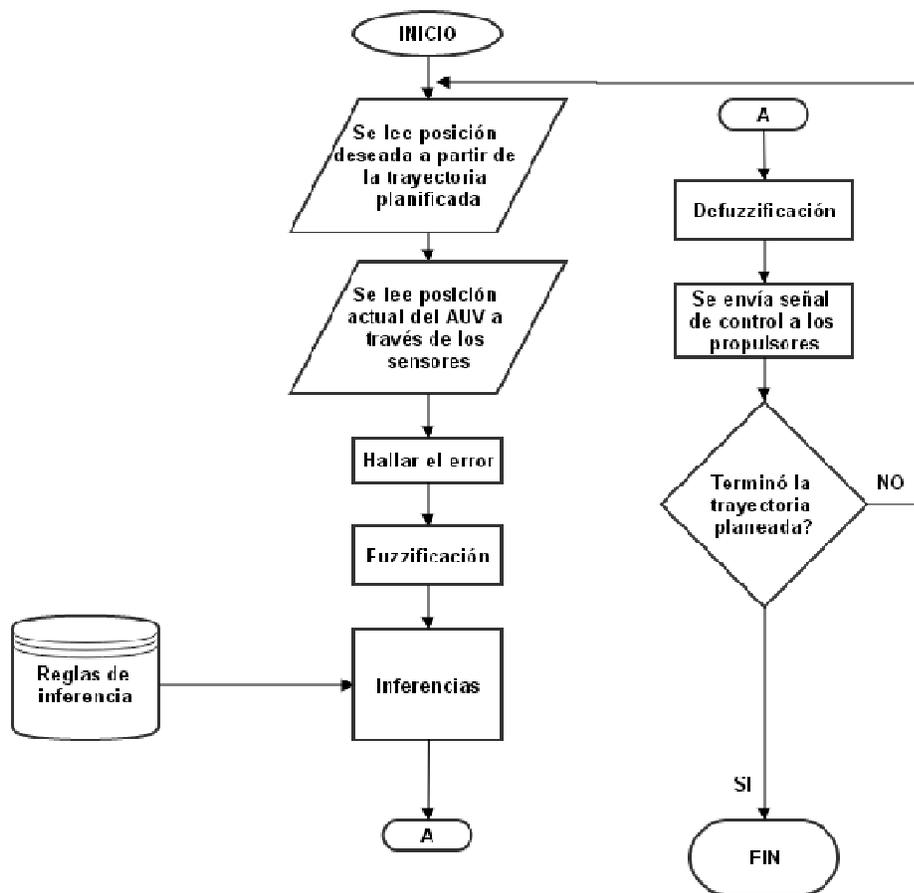


Figura 3.5.3 Diagrama de flujo del programa de control de movimiento

En primer lugar se halla el error de posición, que se define como la posición en la que se debería estar menos en la posición que se encuentra el AUV actualmente. El valor de este error es la entrada al proceso de fuzzyficación. Este procedimiento, consiste en hallar el grado de pertenencia que posee cada entrada a los conjuntos asociados. Por ejemplo, supóngase que se tienen los siguientes conjuntos

asociados: profundidad baja, profundidad media y profundidad alta, y de acuerdo al sensor de presión el AUV se encuentra a 15m bajo el agua, puede decirse que este nivel de profundidad es 36% de profundidad baja y 64 % de profundidad media. En este proceso se define tanto a los conjuntos de entrada como a los conjuntos de salida. Luego de la fuzzyficación, se determina los métodos de inferencia, que viene a ser la determinación de una salida dadas ciertas entradas. Estas reglas se determinan de acuerdo a la experiencia del diseñador en el proceso a controlar. Luego, está el proceso de defuzzyficación, el cual consiste en convertir, las reglas de pertenencia a la salida del controlador difuso, a un número que pueda ser usado como acción de control. Por último, en el diagrama se puede observar que existe un bucle en el que se trata de cumplir la trayectoria planeada, y el control de movimiento culmina cuando esta haya sido cumplida.

Visión

Los algoritmos de visión que se vayan a usar para el proyecto son muy importantes, pues a partir de la visión por computadora se estiman los resultados. En la figura 3.5.4, se presenta el diagrama de flujo que debe seguir el programa del controlador para estimar la talla de los peces.

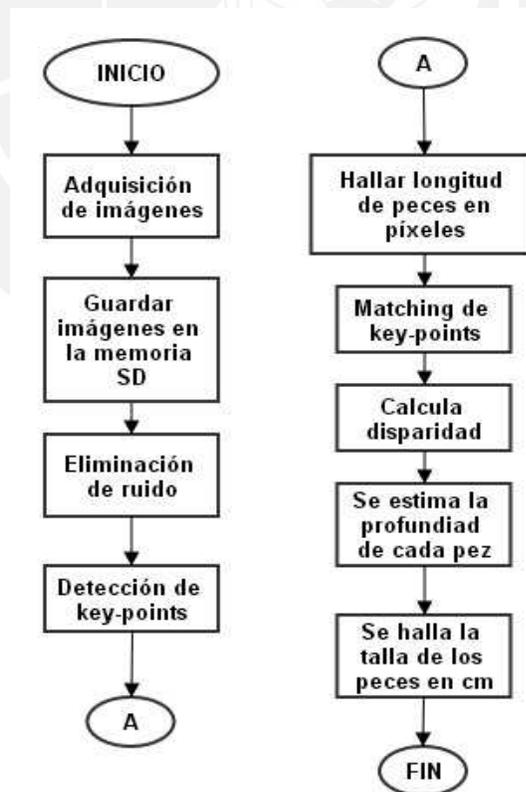


Figura 3.5.4 Diagrama de flujo del proceso de visión por computadora

Es necesario mencionar que antes de que el AUV empiece su misión, se le debe haber realizado el proceso de calibración de cámara. Mediante este proceso se

puede conocer experimentalmente el valor de distancia focal, parámetro necesario para estimar la profundidad a través de visión estereoscópica. Si bien es cierto, la distancia focal puede ser conocida a través de los datos técnicos del lente que usa, este es un valor teórico mientras que el valor obtenido mediante la calibración es el valor real. El proceso consiste en proyectar puntos 3D sobre la imagen. Luego, se compara sus proyecciones con sus respectivas coordenadas de píxeles sobre la imagen, y se repite el proceso hasta que el error de proyección disminuya.

Después de que ya se ha realizado la calibración de ambas cámaras, se procede con la adquisición de imágenes, para lo cual el BeagleBone debe solicitar el envío de imágenes de ambas cámaras. Luego, se guarda las imágenes en la memoria SD que se encuentra en el BeagleBone, con el propósito de que el usuario pueda visualizar las imágenes capturadas por el AUV al término de su misión. Luego, se realiza el pre-procesamiento de imágenes, con el objetivo de mejorar la eficacia de los algoritmos de las siguientes etapas. En esta etapa se trata de eliminar el ruido en la imagen, que muy probablemente es causado por la iluminación. Para ello se puede realizar la convolución de una imagen con una máscara de tipo promediador o puede usar un filtro gaussiano que considera al ruido como una distribución gaussiana a la cual se debe contrarrestar. Las técnicas descritas anteriormente, son usadas muy comúnmente, por lo que cualquier de las dos puede ser usada.

Luego, continúa la etapa de detección de *keypoints*, o también llamados puntos clave. Dado que se quiere hallar la longitud de los peces, se plantea considerar como *keypoints* a las aletas traseras y a la cabeza del pez, cuyas formas son muy reconocibles, y constituyen los extremos de los peces, a partir de los cuales se puede obtener la longitud del pez. Para realizar la detección de estas características se puede usar el algoritmo *Viola-Jones* usado efectivamente para detección de rostros [24]. Si bien es cierto la fama de esta técnica proviene de la detección de rostros, en [24] se menciona que este algoritmo puede ser usado para la detección de otros objetos. Para ello se debería realizar el entrenamiento del algoritmo en base a las formas de los peces para que se pueda detectar las aletas y cabezas de los peces. La figura 3.5.5 [25], muestra una imagen de muchos peces muy cerca entre sí, a la cual se le ha realizado la detección de aletas. Esta imagen ilustra a lo que se quiere llegar con la detección de *keypoints*.

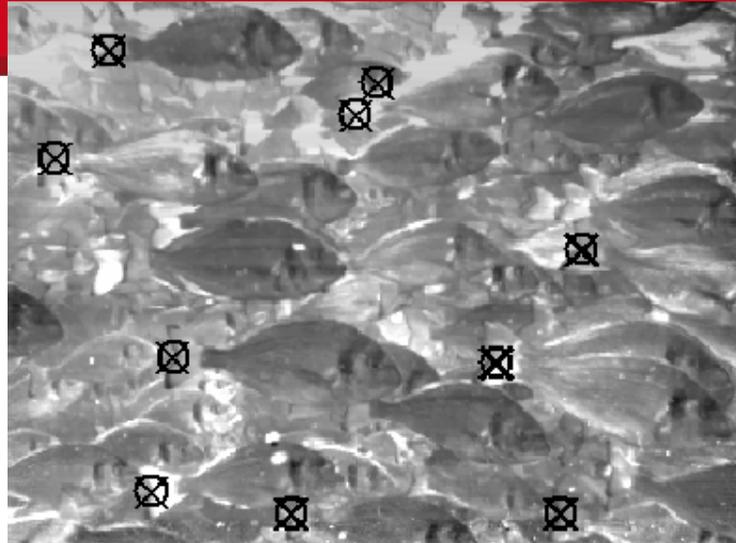


Figura. 3.5.5 Imagen de extracción de keypoints

Para hallar la longitud del pez en píxeles, ya se cuenta con los puntos extremos; sin embargo, no se sabe la correspondencia entre *keypoints* de aleta y *keypoints* de cabeza. Por lo cual, se usa la técnica de segmentación *Watershed*. Esta técnica tiene la característica de realizar la segmentación en elementos que se encuentran muy cercanos entre sí y cuyos contornos son bien definidos, característica compatible con los cardúmenes de anchoveta. Además, esta técnica ha sido usada anteriormente para la segmentación de sedimentos de rocas [26], mostrando buenos resultados. Una vez que se encuentren los peces segmentados, se puede realizar la correspondencia entre *keypoints* aleta y cabezas que pertenezcan a la misma región segmentada. De esta forma se puede calcular el tamaño medido en píxeles de cada pez al que se le haya detectado sus *keypoints*.

Hasta este punto se conoce la longitud de cada pez en píxeles. Sin embargo, para hallar la longitud real se requiere conocer a la profundidad a la que se encuentran los peces, y de esta manera poder tener todos los tamaños en una misma escala, y dado que se conoce los parámetros internos de la cámara se puede determinar una equivalencia entre la longitud en número de píxeles y la longitud en cm.

Para estimar la profundidad a la que se encuentran los peces se requiere analizar la disparidad presente en las imágenes de ambas cámaras. Para ello, se debe hacer la correspondencia entre un *keypoint* de una imagen con su correspondiente en la otra imagen. Para ello se usa el algoritmo RANSAC, el cual permite realizar la correspondencia entre *keypoints* de manera rápida y con poco porcentaje de error, comparado con el de algoritmos similares [27]. Dado, que ya se cuenta con los *keypoints* relacionados en ambas imágenes, se procede hallar la disparidad para cada *keypoint*. Es decir, se halla la diferencia de posiciones de un *keypoint* entre

ambas imágenes. Como ya se calculó la disparidad, se procede a hallar la profundidad, a partir de la siguiente fórmula [28]:

$$z = \frac{b * f}{disparidad}$$

Donde b es igual a la distancia entre los lentes de cada cámara, f es la distancia focal y z es la profundidad. Debe notarse que, que cuando un objeto se encuentra muy distante, la disparidad es casi nula.

Dado que ya se cuenta con la longitud en pixeles de cada pez, la distancia a la que se encuentran de la cámara y la equivalencia entre pixeles y cm se puede conocer el tamaño real de un pez.



Presupuesto

A continuación se presenta el presupuesto para el desarrollo del proyecto. Las tablas desde la 4.1 a la 4.7 se dividen de acuerdo a los subsistemas del sistema mecatrónico. Cabe resaltar que se considera en una tabla aparte a los costos de manufactura de piezas. Finalmente, se halla el costo total en una tabla que contiene los costos de cada subsistema.

Tabla 4.1: Presupuesto total

	Precio en USD	Precio en PEN
Sistema de energía	720.54	1,945.46
Sistema de visión	2,302.24	6,216.05
Sistema de navegación	1,413.26	3,815.80
Sistema de propulsión	3,491.95	9,749.52
Sistema de comunicación	4,250.00	11,475.00
Manufactura de piezas	-----	2,355.00
BeagleBone (+ shipping)	145.00	391.50
Cables y conectores SEA CON	415.22	1,121.09
Componentes electrónicos varios	-----	50.00
Componentes de sujeción varios	-----	50.00
Total		37,169.42

Tabla 4.2: Presupuesto de componentes del sistema de energía

Sistema de energía	Precio en USD	Precio en PEN
Batería 11.1 V (4x)	439.96	1,187.89
Batería 14.8 V	82.99	224.07
Cargador	119.99	323.97
Shipping	77.60	209.52
Subtotal	720.54	1,945.46

Tabla 4.3: Presupuesto de componentes del sistema de visión

Sistema de visión	Precio en USD	Precio en PEN
Lámparas	1,197.44	3,233.09
Cámaras (+ gasto de envío)	1,104.80	2,982.96
Subtotal	2,302.24	6,216.05

Tabla 4.4: Presupuesto de componentes del sistema de navegación

Sistema de navegación	Precio en USD	Precio en PEN
IMU	1,228.00	3,315.60
GPS	40.00	108.00
Sensor de presión	145.26	392.20
Subtotal	1,413.26	3,815.80

Tabla 4.5: Presupuesto de componentes del sistema de propulsión

Sistema de propulsión	Precio en USD	Precio en PEN
Propulsores	2,396.00	6,689.63
Soportes de montaje	276.00	770.59
Grasa de mantenimiento	14.95	41.74
ESC's	720.00	2,010.24
Gastos de envío	85.00	237.32
Subtotal	3,491.95	9,749.52

Tabla 4.6: Presupuesto de componentes del sistema de comunicación

Sistema de comunicación	Precio en USD	Precio en PEN
Kit de módem acústico	3,850.00	10,395.00
Gastos de envío	400.00	1,080.00
Subtotal	4,250.00	11,475.00

Tabla 4.7: Presupuesto de manufactura de piezas

Fabricación de piezas	Precio en PEN
Soporte iluminación	65.00
Soporte de modem	25.00
Placa Tarjetas	80.00
Placa baterías	80.00
Soporte cámara (x2)	30.00
Soporte sensor de presión	25.00
Soporte tubos trasero (x2)	400.00
Soporte tubos central	200.00
Impresión 3D (subtotal)	905.00
Mecanizado (subtotal)	1,450.00
Subtotal	2,355.00

Capítulo 5

Conclusiones

- El AUV propuesto tiene la capacidad de estimar el porcentaje de peces juveniles de un cardumen y puede ser usado por las empresas dedicadas al rubro de la pesca para evitar las multas correspondientes a la pesca de anchovetas juveniles.
- El costo del AUV propuesto, S/. 38,000.00, resulta menor a S/. 800,000.00 que es el monto impuesto a un conjunto de grandes empresas pesqueras en el mes de Enero del año 2013.
- La forma hidrodinámica del AUV permite que el AUV propuesto pueda cumplir su misión en un tiempo máximo de 20 minutos, el cual es menor en muchos casos al tiempo usado por las embarcaciones en su proceso de pesca. De esta manera no se afecta el proceso de pesca.
- El peso del AUV, 14 Kg, permite que este pueda ser cargado por dos personas, evitando así LARS (*Launch and Recovery System*), estructuras adicionales para cargar y lanzar el AUV.

Bibliografía

- [1] C. Paredes – Instituto del Perú “Eficiencia y equidad en la pesca peruana: la reforma y los derechos de pesca”, pp. 3, 2012
- [2] OLDEPESCA “Informe sobre la situación actual del comercio pesquero en América latina y el Caribe “, pp. 33, 2011.
- [3] PROM PERU “Informe anual 2010 Desarrollo del comercio exterior pesquero “, pp.45.
- [4] J. Rómulo, De Vildoso IMARPE Instituto del Mar del Perú “La Anchoveta (*Engraulis ringens* J.): conocimiento actual sobre su biología ecología y pesquería” pp.18
- [5] Grupo de Análisis para el Desarrollo, “El cluster pesquero de Chimbote: Acción conjunta limitada y la tragedia de los recursos colectivos”, pp. 38, 2005
- [6] Come anchoveta “Historia actual de la industria pesquera peruana”, http://www.anchoveta.info/index.php?option=com_content&task=view&id=29&Itemid=88
- [7] Universidad Peruano Cayetano Heredia, “La pesquería anchoveta peruana” pp. 34, 20
- [8] “Talla mínima de captura y tolerancia máxima de ejemplares juveniles para extraer los principales peces marinos”, pp. 3 ,2001
- [9] “El agua de mar: Composición y propiedades”, www.desarrollomaritimo.cl/docum/oceanografiamarina.pdf , pp. 1
- [10] MINCETUR, “Perfil del Mercado y Competitividad Exportadora de las Conservas de Anchoveta”, pp. 3
- [11] A. Ruiz “Diseño de un sistema de control autónomo para un vehículo submarino AUV” pp. 63, 2009
- [12] Australian Centre for Field Robotics, “Integrated Marine Observing System AUV Facility”
- [13] E. Clarkd, C. Whitmire, H. Singh, “Developing the SeaBED AUV as a Tool for Conducting Routine Surveys of Fish and their Habitat in the Pacific”
- [14] K. Fuhr, “Battery Pod Data Sheet”, CUAUV, spring 2010, pp.1

- [15] Association for Unmanned Vehicle Systems International, "Engineering Primer Document for the Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Team Competition". pp. 76, 2007
- [16] CAUV, "Red Herring", http://www.cambridgeauv.co.uk/Red_Herring
- [17] R. Altshuler, J Apgar , " ORCA – V: An autonomous Underwater Vehicle", pp. 7
- [18] J. Reynolds, "Autonomous Underwater Vehicle: Vision System ", 1998, pp. 11
- [19] J, Stachiw, "Acrylic Plastic as Structural material for Underwater Vehicles", pp. 1, 2004
- [20] Texas Instruments, "BeagleBone Black open source Linux computer unleashes innovation", pp. 1, 2013
- [21] FAMU-FSU College, eng.fsu.edu/me/senior_design/2011/.../M5.pptx
- [22] L. Gonzales, "Design, modeling and control of an Autonomous Underwater Vehicle", pp. 53, 2004
- [23] G. Ortiz, "Calibración de Cámaras Panorámicas Utilizando la Transformada de Fourier en Sistemas Cilíndricos", pp. 5, 2009
- [24] P. Viola, M. Jones, "Robust Face Detection", pp. 144, 2003
- [25] R. Martinez, "Técnicas de segmentación", pp. 31
- [26] W. Wang, "Rock Particle Image Segmentation and Systems", pp. 200, 2008
- [27] K. Derpanis, "Overview of the RANSAC algorithm", pp. 1, 2010,
- [28] J. Pfautz, Trinity University of Cambridge, "Depth Perception in Computer Graphics", pp. 5, 2000
- [29] J. Gonzales, "AUV multipropósito de bajo consumo", pp. 90, 2006
- [30] N. Storkersen, "Power sources for AUV's", pp.2.
- [31] G. Saestersdal, I. Tsukayama, B. Alegre, "Fluctuaciones en la Abundancia Aparente del Stock de Anchoqueta en 1959 - 1962", pp.5, 1965.