

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS
PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR:

Renzo Martin Mendoza Rabanal

ASESOR:

Diego Martin Arce Cigüeñas

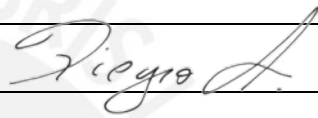
Lima, Marzo, 2024

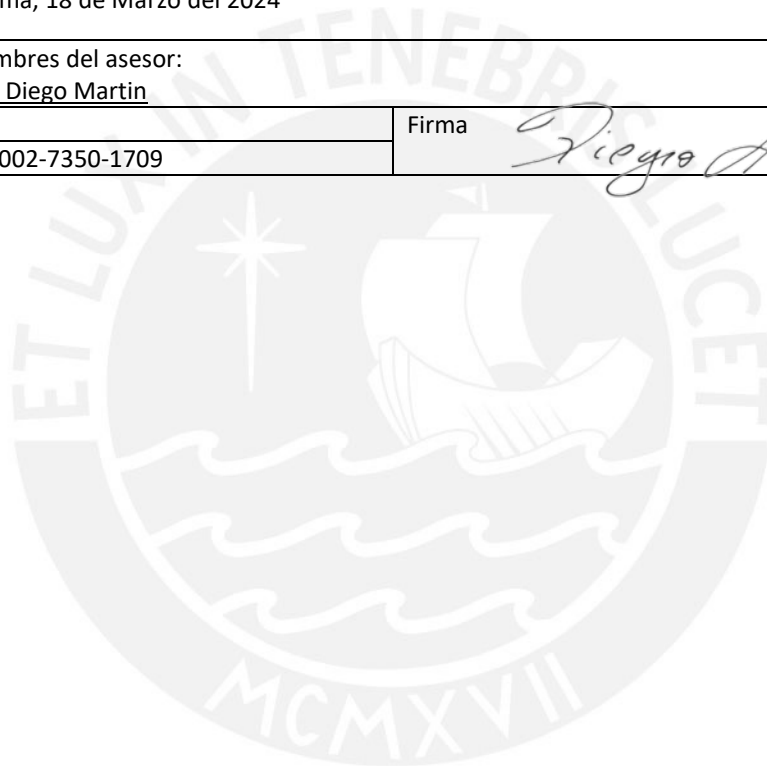
Informe de Similitud

Yo, Diego Martin Arce Cigüeñas docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado "Sistema de adquisición de imágenes submarinas para la generación de tours virtuales", del/de la autor Renzo Martin Mendoza Rabanal deo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 13 %. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 15/03/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 18 de Marzo del 2024

Apellidos y nombres del asesor: <u>Arce Cigüeñas, Diego Martin</u>	
DNI: 46726472	Firma 
ORCID: 0000-0002-7350-1709	



RESUMEN

El desarrollo del turismo en los ambientes submarinos es una actividad con alto potencial gracias a las características de estos entornos, ideales para el desarrollo de este sector. No obstante, el desarrollo actividades en los entornos submarinos pueden causar consecuencias irreparables, como el aumento de la contaminación y agobio de las especies submarinas debido a la fragilidad de los ecosistemas presentes. Una solución para promover el ecoturismo es el uso de los recorridos virtuales construidos a partir de información obtenida de estos entornos. Para ello, se requieren sistemas destinados a la adquisición de estos datos, los cuales se pueden encontrar en el mercado, pero presentan diseños rígidos y son de alto costo. Debido a ello, se plantea el desarrollo de una tecnología de bajo costo que permita la adquisición de los datos necesarios para la reconstrucción virtual de los ambientes submarinos y permita su uso por una buzo o un vehículo submarino.

El presente trabajo de tesis forma parte del proyecto Concytec 161-2020 - Sistema de Fotogrametría Submarina y Visión por Computadora Avanzado para generación de videos 360° y modelos virtuales digitales de sectores submarinos con potencial turístico en el Perú. El documento desarrolla el diseño de un sistema de adquisición de imágenes submarinas de tres cámaras para obtener información de los ambientes de interés para la generación de recorridos virtuales hasta una profundidad máxima de 750 m. Este sistema es capaz de estimar su desplazamiento relativo y obtener su orientación para generar imágenes georreferenciadas y reducir el tiempo de generación de los ambientes virtuales. Este sistema cuenta con dos configuraciones para ser usado por un buzo profesional (hasta una profundidad mínima de 60 m) o un ROV submarino, lo cual destaca ante los sistemas comerciales enfocados únicamente a uno de estos modos de uso.

El trabajo consta del diseño de tres dominios principales. (i) El sistema mecánico se compone de una estructura de soporte conformada por perfiles estructurales y cuatro contenedores cilíndricos que contienen a los elementos electrónicos. (ii) El sistema electrónico cuenta con circuitos diseñados para el sensado del voltaje de batería y protección ante ingreso de agua, realizando simulaciones para verificar su funcionamiento. A su vez, se realizó la selección de los componentes electrónicos y fuente de alimentación. En el desarrollo de (iii) la etapa de control, se realizó el diseño de la interfaz y se propuso una estrategia de control de iluminación adaptativo basada en la diferencia de luminosidad entre la imagen sensada y la imagen con iluminación óptima; esta última es obtenida al aplicar una ecualización de histograma a la imagen original. Por otra parte, se simuló un algoritmo de estimación de desplazamiento basado en el filtro de Kalman, el cual mostró una desviación significativa entre el valor real y estimado de desplazamiento.

Para comprobar el funcionamiento del sistema, se implementó un prototipo enfocado únicamente a su modo de uso por buzo. Las pruebas realizadas demuestran que el sistema es capaz de aislar los componentes eléctricos y electrónicos ante el entorno acuático. Por otra parte, se comprobó que el tiempo de operación del prototipo es mayor a 120 minutos. Finalmente, se realizaron pruebas del control de iluminación donde se concluyó que la iluminación óptima es tal que el error generado no cambia al aumentar la intensidad de luz que proveen las luces submarinas.

El autor quiere agradecer al CONCYTEC y su programa PROCIENCIA por brindar los fondos para el desarrollo de esta tesis, que forma parte del proyecto 161-2020 - Sistema de Fotogrametría Submarina y Visión por Computadora Avanzado para generación de videos 360° y modelos virtuales digitales de sectores submarinos con potencial turístico en el Perú.

Agradezco a mis padres Hortencia y William por su guía y sustento durante toda mi vida, y a mi hermana Claudia que me ha apoyado y aconsejado en mi desarrollo profesional. Agradezco a mi asesor Diego Arce quien me ha instruido y encaminado a través del desarrollo del proyecto de tesis. También, a los investigadores y colaboradores del proyecto en cuestión. Agradezco a mis amigos Diego, Daniel, Luis, Marcelo, Dario, Fiorella y Enzo, por su apoyo durante mi vida universitaria.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES AL DISEÑO.....	3
1.1 Problemática.....	3
1.2 Propuesta solución.....	6
1.3 Objetivos.....	7
1.4 Metodología.....	8
1.5 Alcance.....	8
ESTADO DEL ARTE.....	10
2.1 Sistemas comerciales.....	10
2.1.1 ORUS 3D series.....	10
2.1.2 SubSLAM X2.....	11
2.1.3 Pro Squid 2.....	12
2.1.4 Sistemas de cámaras submarinas.....	12
2.1.5 Comparativa de sistemas comerciales.....	13
2.2 Proyectos de investigación.....	13
2.2.1 Sistema submarino de visión estereoscópica.....	13
2.2.2 SeaArray.....	14
2.2.3 ROV 3D.....	14
2.2.4 Sistema trifocal acoplable.....	15
2.2.5 Sistema manual de visión estereoscópica.....	16
2.2.6 Comparativa de proyectos de investigación.....	16
2.3 Patentes.....	17
DISEÑO CONCEPTUAL.....	19
3.1 Requerimientos del sistema.....	19
3.1.1 Requerimientos mecánicos.....	19
3.1.2 Requerimientos eléctricos y electrónicos.....	20
3.1.3 Requerimientos de <i>software</i>	22
3.1.4 Otros requerimientos.....	22
3.2 Estructura de funciones.....	23

3.2.1	Caja negra.....	23
3.2.2	Funciones del sistema	24
3.3	Matriz morfológica.....	26
3.3.1	Dominio de procesamiento y control	26
3.3.2	Dominio de sensores	27
3.3.3	Dominio mecánico	28
3.3.4	Dominios eléctricos: energía, actuadores, interfaz y almacenamiento	29
3.4	Concepto de solución óptimo.....	30
3.4.1	Modelo 3D preliminar.....	31
3.4.2	Diagrama de bloques.....	32
DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA.....		35
4.1	Diseño de la estructura de soporte	35
4.1.1	Análisis y selección de materiales.....	35
4.1.2	Dimensionamiento de la estructura.....	37
4.1.3	Esfuerzos mecánicos en la estructura.....	39
4.2	Diseño de los <i>enclosures</i> de albergue de componentes	42
4.2.1	Estimación de las dimensiones de los <i>enclosures</i>	42
4.2.2	Análisis del desempeño de los <i>enclosures</i> comerciales	45
4.2.3	Diseño de los sellos laterales.....	46
4.3	Diseño de los componentes de sujeción externos	50
4.3.1	Diseño de la cubierta delantera	51
4.3.2	Diseño de los sujetadores de luces y análisis del rango de operación	52
4.3.3	Análisis de la resistencia y ajuste de tornillos de conexión	54
4.4	Diseño de los componentes de sujeción internos	55
4.4.1	Diseño de la bandeja del <i>enclosure</i> principal.....	55
4.4.2	Diseño de los soportes de las cámaras	57
4.5	Diseño del acople universal entre el sistema y ROV	58
4.6	Listado de planos mecánicos.....	59
DISEÑO ELECTRÓNICO DEL SISTEMA		61
5.1	Selección de componentes	61
5.1.1	Selección de sensores para estimación del desplazamiento y orientación	62
5.1.2	Selección de componentes para adquisición de imágenes e iluminación	65
5.1.3	Selección de componentes electrónicos y control.....	68
5.1.4	Cálculo de consumo energético y selección de batería.....	75
5.2	Diseño de los circuitos de control	77
5.2.1	Diseño del circuito de protección ante ingreso de agua.....	77
5.2.2	Diseño del circuito para el sensado del voltaje de batería.	78
5.3	Elaboración de diagramas esquemáticos.....	79

5.4	Diseño del <i>shield</i> y placa de circuito impreso.....	82
5.5	Distribución de componentes en el <i>enclosure</i> principal	83
5.6	Conexiones y cableado del sistema.....	84
DISEÑO DE LA ETAPA DE CONTROL		85
6.1	Desarrollo de la interfaz	85
6.1.1	Esquematización de la lógica de activación de selectores	85
6.1.2	Diseño de la interfaz en el panel HMI	87
6.2	Diseño del control de iluminación adaptativo.....	88
6.2.1	Descripción de los parámetros en la iluminación de una imagen	88
6.2.2	Propuesta de la estrategia de control.....	89
6.2.3	Desarrollo algorítmico del controlador de iluminación	91
6.3	Estimación de posición del sistema en el entorno submarino.....	93
6.3.1	Estimación del desplazamiento mediante el uso de datos inerciales	93
6.3.2	Estimación de posición con el sensor inercial y barómetro	94
6.3.3	Simulación del algoritmo de estimación con datos inerciales	95
6.4	Descripción del proceso general de control	96
PROTOTIPADO DEL SISTEMA		98
7.1	Descripción del prototipo.....	98
7.1.1	Sistema integrado: modelo virtual	98
7.1.2	Implementación del prototipo	100
7.2	Pruebas del sistema mecánico en el entorno acuático.....	102
7.3	Pruebas de la operación del sistema.....	102
7.3.1	Desempeño en la adquisición de imágenes.....	102
7.3.2	Tiempo de operación del sistema.....	103
7.3.3	Resultados del control de iluminación adaptativo	104
ANÁLISIS DE COSTOS		111
8.1	Costo de componentes mecánicos y electrónicos	111
8.2	Costo de fabricación.....	113
8.3	Costo de diseño	115
8.4	Costo de implementación y pruebas	115
8.5	Costo total	116
CONCLUSIONES		117
RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO		118
BIBLIOGRAFÍA		119
ANEXOS		125

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Evolución del aporte del turismo al PBI desde 1994 hasta 2018.	4
Figura 1.2: Mercado de realidad aumentada y realidad virtual para el valor de la industria del turismo.	5
Figura 1.3: Sistema para fotogrametría compuesto por tres cámaras sincronizadas. ..	7
Figura 2.1: (a) Sistema de 300 m, (b) sistema de 3000 m, (c) sistema de 6000 m, (d) sistema para uso de buzo.	11
Figura 2.2: (a) SubSLAM X2, (b) conexión del módulo a un ROV submarino.	11
Figura 2.3: Pro Squid 2.	12
Figura 2.4: Canon 1DX Mark II.	12
Figura 2.5: Contenedor del sistema de control (izquierda) y Contenedores de las cámaras (derecha).	14
Figura 2.6: SeaArray operado por un buzo.	14
Figura 2.7: Imágenes del sistema conectado al Rémora 2000 ROV (a) lista de las tres cámaras sincronizadas, (b) vista del subsistema de control encapsulado.	15
Figura 2.8: Sistema trifocal acoplado al BlueROV2.	15
Figura 2.9: Sistema de estereovisión portátil.	16
Figura 2.10: Patente del sistema de adquisición de imágenes panorámicas.	17
Figura 2.11: Representación del sistema con sus componentes principales.	18
Figura 3.1: Caja negra del sistema.	23
Figura 3.2: Diagrama de funciones del sistema.	25
Figura 3.3: Esquema del sistema general.	31
Figura 3.4: Esquema de la distribución de componentes electrónicos en el <i>enclosure</i> principal.	31
Figura 3.5: Esquema de los <i>enclosures</i> secundarios.	31
Figura 3.6: Diseño conceptual del sistema en su modo de uso por buzo (izquierda) y ROV (derecha).	32
Figura 3.7: Diagrama de bloques del sistema – buzo.	33
Figura 3.8: Diagrama de bloques del sistema – ROV.	33

Figura 4.1: Perfil V-SLOT 2020 (izquierda), conector de tres vías (centro) y <i>bracket</i> de esquina a 90° (derecha).....	37
Figura 4.2: Estructura de soporte (derecha) y ubicación de los componentes principales.	37
Figura 4.3: Longitudes principales en la estructura principal.....	38
Figura 4.4: Ubicación de los perfiles de soporte de cargas.....	40
Figura 4.5: Distribución de cargas en el arreglo de perfiles.	41
Figura 4.6: Esfuerzos normales máximo (izquierda) y mínimo (derecha) en la estructura.	41
Figura 4.7: Desplazamiento de la estructura ante cargas críticas.....	42
Figura 4.8: <i>Penetrator</i> para conexión con <i>enclosure</i>	43
Figura 4.9: Dimensiones de componentes en <i>enclosure</i> principal.....	43
Figura 4.10: <i>Enclosure</i> principal de 4 pulg (izquierda) y <i>enclosure</i> de 2 pulg para cámaras laterales.....	44
Figura 4.11: Factor de seguridad del <i>enclosure</i> de 4 pulg según simulación por elementos finitos.....	45
Figura 4.12: Factor de seguridad del <i>enclosure</i> de 3 pulg según simulación por elementos finitos.....	46
Figura 4.13: Sello lateral de una pieza (izquierda) y de dos piezas (derecha).	47
Figura 4.14: <i>Penetrators</i> en los <i>enclosures</i> secundarios (izquierda), 4 pulg para el modo buzo (centro) y modo ROV (izquierda).	47
Figura 4.15: Diámetro efectivo (D) de aplicación de presión en los sellos laterales.	48
Figura 4.16: Sello lateral para <i>penetrators</i> de 3 pulg (a), sello lateral cerrado de 4 pulg (b), sello lateral para <i>penetrators</i> de 4 pulg (c).	49
Figura 4.17: Factores de seguridad en el sello lateral de 4 pulg cerrado (izquierda) y localización del factor de seguridad mínimo (derecha).....	49
Figura 4.18: Factores de seguridad en el sello lateral con agujeros de 3 pulg (izquierda) y de 4 pulg (derecha).	50
Figura 4.19: Cubierta delantera de soporte de <i>enclosures</i> secundarios en la configuración de buzo (izquierda) y ROV (derecha).	51
Figura 4.20: Factor de seguridad de la cubierta delantera.	52
Figura 4.21: Área de sensado del sistema y parámetros de interés.....	52

Figura 4.22: Distribución de luces submarinas para uso por buzo (derecha) y para uso por ROV (izquierda).....	53
Figura 4.23: Soportes superiores (a) e inferior (b) del <i>enclosure</i> principal, soportes del <i>enclosures</i> secundarios de 2 pulg (c) y 3 pulg(d).....	54
Figura 4.24: Soportes de <i>enclosure</i> en el sistema general.	55
Figura 4.25: Bandeja del <i>enclosure</i> principal.	56
Figura 4.26: Sujetador de cámaras laterales (derecha) y alineamiento de <i>enclosure</i> de 2 pulg (izquierda).	57
Figura 4.27: Soporte de cámara principal y elementos de alineación entre sellos laterales.....	58
Figura 4.28: Sistema ensamblado a un ROV mediante el acople universal.....	58
Figura 4.29: Esfuerzos en el acople universal.....	59
Figura 5.1: Sensor Bar100.	63
Figura 5.2: Sensor Bar30.	63
Figura 5.3: Unidad de medición inercial BNO055.	64
Figura 5.4: Low-light HD USB camera.	65
Figura 5.5: Cámara e-CAM82_USB.....	66
Figura 5.6: UWL-401 (izquierda) y Lumen Subsea light (derecha).	67
Figura 5.7: Sensor de fuga.	68
Figura 5.8: Indicador submarino (izquierda) y <i>switch</i> submarino (derecha).	69
Figura 5.9: Computador Jetson Nano.	70
Figura 5.10: Microcontrolador Blue Pill.....	71
Figura 5.11: Pantalla de 2.2 pulg ILI3241.	72
Figura 5.12: Regulador de voltaje XL4015.....	73
Figura 5.13: Conector DBH13M.	74
Figura 5.14: Módulo relé 5V a 1 canal.	75
Figura 5.15: Batería 12.6 V a 6.4 Ah seleccionada.....	76
Figura 5.16: Circuito <i>latch</i> para control de alimentación.	77
Figura 5.17: Voltajes de entrada y salida del primer (a), segundo (b), tercer (c) y cuarto estado (d) del circuito <i>latch</i> para control de alimentación.	78

Figura 5.18: Circuito para sensado de voltaje de batería.	78
Figura 5.19: Gráfica de la relación de voltaje de batería y de entrada a ADC.....	79
Figura 5.20: Diagramas esquemáticos del sistema – Buzo.....	80
Figura 5.21: Diagramas esquemáticos del sistema – ROV.....	81
Figura 5.22: Placa de circuito impreso del sistema.....	82
Figura 5.23: <i>Shield</i> para el computador Jetson Nano.....	83
Figura 5.24: Componentes en el <i>enclosure</i> principal - Buzo.....	83
Figura 5.25: Componentes en el <i>enclosure</i> principal - ROV.....	84
Figura 6.1: <i>Switches</i> del sistema de adquisición de imágenes.	86
Figura 6.2: Formato de imagen mostrada.	87
Figura 6.3: Histograma y su relación con el contraste de diferentes imágenes.	88
Figura 6.4: Diagrama de bloques de la estrategia de control.	91
Figura 6.5: Diagrama de flujo del algoritmo de control.	92
Figura 6.6: Diagrama de flujo del algoritmo de estimación de desplazamiento y orientación.	95
Figura 6.7: Gráfica de la trayectoria real y estimada.	96
Figura 6.8: Diagrama de flujo general de control.	97
Figura 7.1: Modelo 3D del sistema para modo de uso por buzo (superior) y para uso por ROV (inferior).....	99
Figura 7.2: Componentes electrónicos en el <i>enclosure</i> principal.	100
Figura 7.3: Prototipo del sistema de adquisición de imágenes submarinas.	100
Figura 7.4: Uso del prototipo por el usuario (izquierda) y por un ROV (derecha)..	101
Figura 7.5: Pruebas en campo del sistema.	101
Figura 7.6: Prototipo del sistema en el entorno acuático.	102
Figura 7.7: Imágenes adquiridas en las pruebas en entorno controlado.	103
Figura 7.8: Imágenes adquiridas en las pruebas en campo.	103
Figura 7.9: Gráfica del voltaje de la batería en el tiempo.	104
Figura 7.10: Resultados de pruebas en superficie – Controlador P.	105
Figura 7.11: Imagen con iluminación óptima en superficie – Controlador P.	106

Figura 7.12: Resultados de pruebas en superficie – Controlador PI.....	107
Figura 7.13: Imagen con iluminación óptima en superficie – Controlador PI.....	107
Figura 7.14: Resultados de pruebas subacuáticas – Controlador P.....	108
Figura 7.15: Imagen con iluminación óptima en piscina – Controlador P.....	109
Figura 7.16: Resultados de pruebas subacuáticas – Controlador PI.	109
Figura 7.17: Imagen con iluminación óptima en piscina – Controlador PI.	110



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1: Comparativa entre sistemas comerciales.	13
Tabla 2.2: Comparativa entre proyectos de investigación.	16
Tabla 3.1: Matriz morfológica del dominio de procesamiento y control – hardware.	26
Tabla 3.2: Matriz morfológica del dominio de procesamiento y control – software.	27
Tabla 3.3: Matriz morfológica del dominio de sensores.	28
Tabla 3.4: Matriz morfológica del dominio mecánico.	29
Tabla 3.5: Matriz morfológica de los dominios eléctricos.	30
Tabla 4.1: Características de los materiales propuestos.	36
Tabla 4.2: Elementos de la estructura de soporte.	39
Tabla 4.3: Elementos de la estructura de soporte.	54
Tabla 4.4: Lista de planos mecánicos.	60
Tabla 5.1: Barómetros para aplicaciones submarinas encontrados.	62
Tabla 5.2: Características del sensor Bar100.	63
Tabla 5.3: Unidades de medición inercial encontradas.	64
Tabla 5.4: Características del sensor e BNO055.	64
Tabla 5.5: Cámaras de resolución media encontradas.	65
Tabla 5.6: Características del modelo Low-light HD USB camera.	65
Tabla 5.7: Cámaras de alta resolución encontradas.	66
Tabla 5.8: Características del modelo e-CAM82_USB.	66
Tabla 5.9: Luces submarinas encontradas.	67
Tabla 5.10: Características de los modelos de luces seleccionados.	68
Tabla 5.11: Características del sensor de fuga.	69
Tabla 5.12: Características del indicador y switch submarino.	69
Tabla 5.13: Variables de entrada y salida del controlador.	70
Tabla 5.14: Características del computador seleccionado.	70
Tabla 5.15: Microcontroladores encontrados.	71
Tabla 5.16: Características del microcontrolador Blue Pill.	71

Tabla 5.17: Pantallas de visualización encontradas.	72
Tabla 5.18: Corriente consumida de los componentes de control.	73
Tabla 5.19: Reguladores de voltaje encontrados.....	73
Tabla 5.20: Conexiones internas requeridas.	74
Tabla 5.21: Características del cable submarino.....	74
Tabla 5.22: Características del módulo seleccionado.	75
Tabla 5.23: Consumo energético de componentes.....	76
Tabla 5.24: Cables y conexiones en los <i>enclosures</i>	84
Tabla 6.1: Funciones de <i>switches</i> submarinos.	86
Tabla 6.2: Estados del sistema – Indicadores submarinos.	87
Tabla 8.1: Costo de materias primas e insumos.....	112
Tabla 8.2: Costo de componentes mecánicos.	112
Tabla 8.3: Costo de componentes electrónicos.....	113
Tabla 8.4: Costo de fabricación por manufactura aditiva.	114
Tabla 8.5: Estimación de costos de fabricación.....	115
Tabla 8.6: Costo de diseño.....	115
Tabla 8.7: Costo de ensamble.....	115
Tabla 8.8: Costo de pruebas.....	116
Tabla 8.9: Costo total del prototipo y del sistema.....	116

LISTA DE SÍMBOLOS

Mecánica

L	: Longitud de la estructura de soporte [mm].
A	: Anchura de la estructura de soporte [mm].
H	: Altura de la estructura de soporte [mm].
$L_{ep,es,se}$: Longitudes efectivas de los <i>enclosures</i> principal, secundario central y secundarios laterales, respectivamente [mm].
f	: Fuerza distribuida debido al arrastre del fluido [N/m].
g	: Fuerza distribuida debido al peso del sistema [N/m].
h	: Fuerza distribuida total en caso uniforme [N/m].
Re	: Número de Reynolds.
C_D	: Coeficiente de arrastre.
F_D	: Fuerza de arrastre [N].
σ_{eq}	: Esfuerzo equivalente [MPa].
$\sigma_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo admisible máximo [MPa].
e_θ	: Error máximo en el ángulo de cabeceo [°].
$L_{p,u,b,s}$: Longitudes de componentes en el <i>enclosure</i> principal [mm].
D	: Diámetro efectivo del sello lateral de los <i>enclosures</i> [mm].
X	: Distancia entre el sistema y ambiente submarino [mm].
S	: Superposición de imágenes [%].
B	: Distancia base entre cámaras [m].
W	: Distancia horizontal entre luces submarinas [mm].
T	: Distancia vertical entre luces submarinas [mm].
M	: Torque de montaje en tornillos de conexión [N · m].

Electrónica

V_{DD}	: Voltaje de la batería [V].
V_{in}	: Voltaje de control del circuito <i>latch</i> [V].
V_{out}	: Voltaje de salida del circuito <i>latch</i> [V].
V_{adc}	: Voltaje en el ADC del microcontrolador [V].

Control

e_c	: Error producto de la referencia y la salida de la planta.
D	: Componente de la profundidad en la señal de control.
u	: Acción de control de las luces submarinas [%].
δ	: Profundidad de sumersión actual [m].
I	: Imagen obtenida del entorno submarino.
I_{eq}	: Imagen ecualizada del entorno submarino.
$I_{w,h}$: Cantidad de pixeles en el ancho y alto de una imagen.
k_p, k_i, η, β	: Parámetros 1 en la ley de control adaptativo.
μ, θ, T_1	: Parámetros 2 en la ley de control adaptativo.
μ_t	: Estado del sistema en el tiempo t .
$\bar{\mu}_t$: Predicción del sistema en el tiempo t .
Σ_t	: Covarianza del estado del sistema en el tiempo t .
$\bar{\Sigma}_t$: Covarianza de la predicción del sistema en el tiempo t .
R, Q	: Varianza del ruido de las mediciones.
z_t	: Medición del sensor obtenida en el tiempo t .

INTRODUCCIÓN

El turismo es una de las actividades más importantes en lo que concierne al ingreso de capital y generación de trabajo en el mundo. Particularmente, en el Perú, uno de los sectores con mayor potencial turístico se encuentra en los ambientes subacuáticos debido a la biodiversidad presente en estos entornos (COMUMA, 2015). No obstante, las actividades turísticas en este tipo de ambientes frágiles pueden significar la pérdida de los recursos presentes, aumento de contaminación, agobio a las especies submarinas, y proliferación del virus SARS-CoV-2, entre otros.

Debido a las cuestiones presentadas, es primordial el uso de tecnologías como los recorridos virtuales que permitan solventar los problemas involucrados y generen una experiencia realista para el desarrollo del ecoturismo en el Perú. Así, en la literatura se han desarrollado productos comerciales y propuestas en el ámbito de investigación con el fin de recolectar imágenes de estos entornos para reconstruirlos en un modelo virtual; cabe resaltar que estos sistemas están enfocados a su uso por buzo o mediante un robot submarino controlado remotamente. No obstante, estos poseen un alto costo y presentan limitaciones que dependen de su forma de uso pues están destinados solamente a uno de estos métodos. Por ello, la presente tesis propone el diseño de un sistema de adquisición de imágenes submarinas georreferenciadas que pueda ser utilizado por un buzo profesional o un vehículo submarino hasta una profundidad máxima de 750 m.

En el primer capítulo, se definirá la problemática que justifica el diseño del sistema de adquisición de imágenes submarinas. Por otra parte, se describe la solución propuesta, el objetivo general y los objetivos específicos, así como la metodología utilizada y los alcances para el desarrollo del concepto de solución óptimo.

En el segundo capítulo, se presenta el estado del arte acerca de los sistemas comerciales y proyectos de investigación relacionados para analizar y comparar sus características importantes. Asu vez, en el tercer capítulo se describen los requerimientos del sistema propuesto y se identificarán las funciones que el sistema debe realizar para cumplir estos requerimientos. A partir de ello, se plantea el desarrollo de la solución óptima obtenida de una evaluación técnico-económica de tres conceptos de solución.

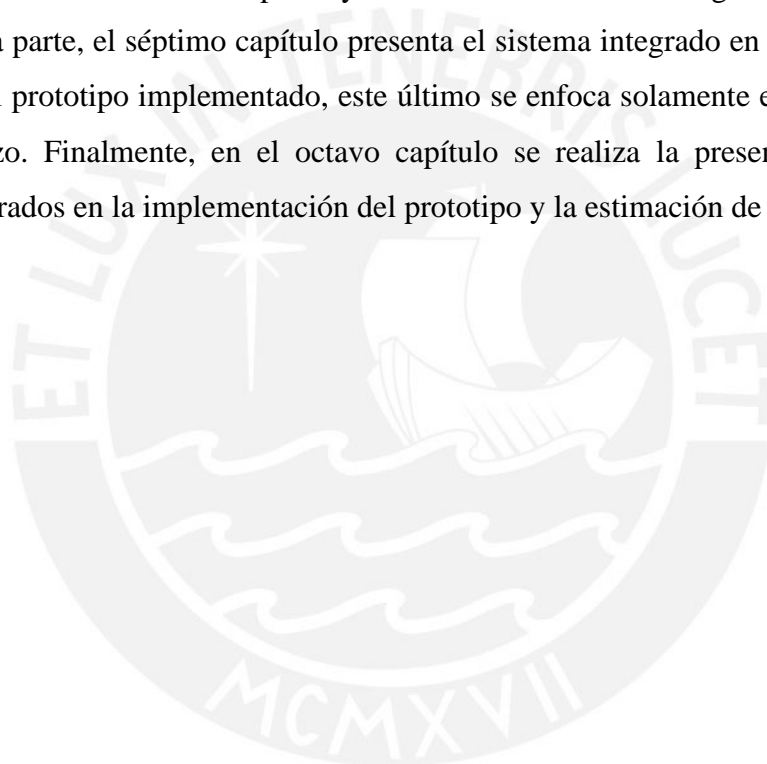
En el cuarto capítulo, se desarrolla el diseño mecánico del sistema a través de cálculos de resistencia ante las cargas críticas presentes durante la operación. El diseño debe considerar la operación del sistema a una profundidad mínima de 60 m para su modo

de uso por buzo y una profundidad de 750 m para su modo de uso por ROV. En este sentido, se realizan simulaciones estáticas de los componentes para validar su integridad.

En el quinto capítulo se desarrolla el diseño electrónico del sistema incluyendo la selección de componentes, diseño de circuitos de control, elaboración de diagramas esquemáticos y diseño de la placa de circuito impreso.

En el sexto capítulo, se presenta el desarrollo de la interfaz del sistema y los algoritmos de control, estos últimos incluyen algoritmos de estimación del desplazamiento y control de las luces submarinas para optimizar de la iluminación con el fin de obtener imágenes con iluminación óptima y reducir el consumo de energía.

Por otra parte, el séptimo capítulo presenta el sistema integrado en sus dos modos de uso y el prototipo implementado, este último se enfoca solamente en el modo de uso por buzo. Finalmente, en el octavo capítulo se realiza la presentación de costos involucrados en la implementación del prototipo y la estimación de los costos totales.



CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES AL DISEÑO

En este capítulo se plantea la problemática relacionada al turismo en ecosistemas submarinos en el Perú y la necesidad del uso de nuevas tecnologías en este sector. Asimismo, se propone una solución abordada mediante el desarrollo del objetivo general y los objetivos específicos. Finalmente, se explica la metodología aplicada y los alcances del proyecto.

1.1 Problemática

En el Perú, la abundancia de recursos turísticos presentes en su territorio ha sido favorable para el desarrollo de este sector. Entre sus características principales se encuentra su mega diversidad, extenso litoral y riqueza gastronómica, entre otros (Ministerio de Economía y Finanzas et al., 2003). En este sentido, la actividad turística en el país ha significado un avance no solo en el ámbito económico, proporcionando empleos y generación de divisas que contribuyen al desarrollo nacional, sino también en el ámbito tecnológico, en donde se ha mejorado las tecnologías de comunicación e instalaciones con demanda turística (Tinoco, 2003). Debido a ello, el número de turistas en el Perú ha incrementado desde el 2005, con 1 570 566 visitantes extranjeros, hasta el año 2018, con 4 419 430 visitantes (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2019); a su vez, esta actividad ha incrementado su aporte en el producto bruto interno (PBI, por sus siglas en español) peruano hasta un 3,8 % como se puede apreciar en la figura 1.1.



Figura 1.1: Evolución del aporte del turismo al PBI desde 1994 hasta 2018

(Fuente: Observatorio Turístico del Perú).

Uno de los destinos con mayor potencial turístico se encuentra en los ecosistemas submarinos presentes en el litoral del Perú; ya que, a lo largo de su extenso litoral de 3 080 km de longitud, se pueden encontrar diversos ambientes subacuáticos atractivos para los turistas extranjeros y locales (COMUMA, 2015). No obstante, para poder realizar las actividades en estas zonas se requiere de equipos especializados para la sumersión de las personas, así como posibles capacitaciones para el manejo de esta instrumentación y un correcto desenvolvimiento en los ambientes submarinos. El costo del equipamiento personal necesario típicamente es superior a 1000 USD adicional al costo de entrenamiento completo y la licencia de buceo de 750 USD, lo que puede aumentar si se requiere de transporte y licencia especial, datos extraídos hasta 2021 . Por otra parte, el tiempo de capacitación generalmente toma entre 3 y 4 días, lo cual, considerando el reducido tiempo de visita de los turistas, no es provechoso para sus próximas actividades (Adreno, 2024).

Los ecosistemas submarinos son llamados ecosistemas frágiles, pues estos albergan a especies vulnerables y de difícil recuperación en el caso de ser afectadas. Por ello, se les consideran zonas biodiversas sensibles a la intervención humana. De este modo, según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, por sus siglas en español), las actividades turísticas podrían afectar la diversidad biológica y los recursos naturales, por lo que, su uso intensivo y no sustentable puede producir pérdidas irreversibles (Tinoco, 2003). De hecho, debido a que las actividades turísticas implican un alto flujo de participantes, es probable que esto signifique un incremento en la contaminación general, el aumento de la presencia de residuos sólidos y basura marina en los ambientes naturales, y se podría producir una invasión y agobio

prolongados hacia las especies que habitan los ecosistemas turísticos. Como ejemplo, entre los años 2005 al 2012 en Perú, en la Reserva Nacional de Paracas, el incremento del número de turistas extranjeros y locales en un 63% significó una presión mayor sobre los ecosistemas marinos (COMUMA, 2015).

Por estos problemas presentados se propone el uso de *tours* virtuales que son descritos como simulaciones de locaciones existentes a través de recursos digitales con todos los efectos asociados que permitan una experiencia realista (El-Said & Aziz, 2021). Estos entornos digitales posibilitan la experiencia turística de conocer los ecosistemas submarinos sin la necesidad de actividades presenciales. De esta forma, el uso de estos recursos digitales propone soluciones para solventar los problemas asociados, mejorar el ecoturismo en el Perú, y busca impulsar el turismo a través de estas nuevas tecnologías; pues, debido al avance de la realidad virtual en las diferentes áreas del sector productivo, se prevé que el valor de los recursos virtuales en el turismo aumente en los próximos años, lo cual se puede apreciar en la Figura 1.2. Cabe resaltar que la justificación detallada se presenta en el Anexo A.1.

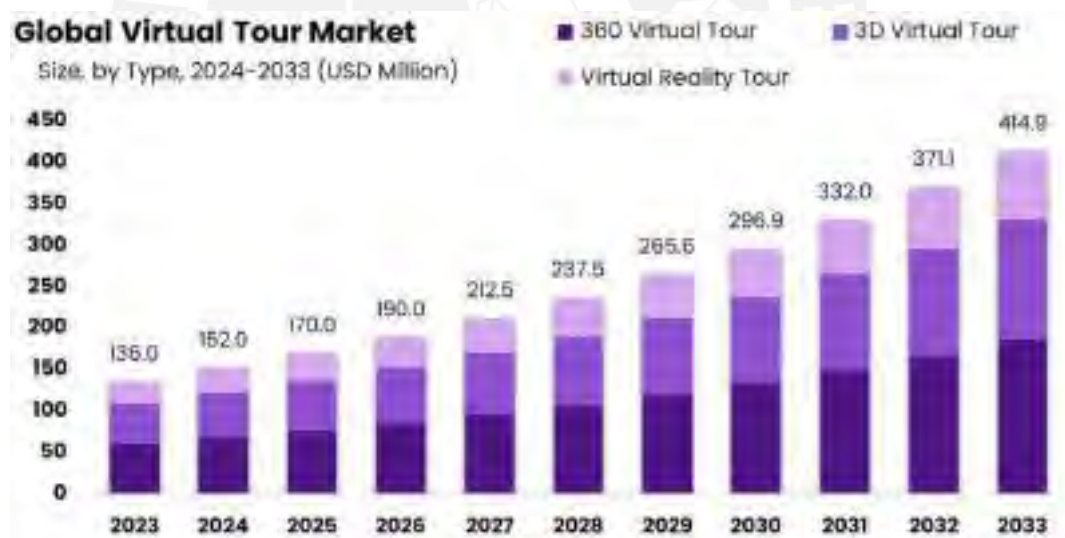


Figura 1.2: Valor de la realidad virtual en el mercado del turismo

(Fuente: Global Virtual Tour Market).

Uno de los retos principales para la generación de estos entornos digitales es la adquisición de los datos necesarios que, mediante técnicas de fotogrametría que utilizan algoritmos de procesamiento de imágenes y visión por computadora, se utilizarán posteriormente para la reconstrucción digital del entorno. Las tecnologías destinadas para esta tarea han mejorado rápidamente en los últimos años, donde

cámaras como GoPro o Sony han sido las opciones más utilizadas para un uso individual, las cuales se utilizan en carcasas a prueba de agua para evitar la falla de estos elementos (Neyer et al., 2014). En este sentido, el avance de estas tecnologías no solamente se ha centrado en el desarrollo de sensores con mejores características, sino también en el diseño de sistemas integrados que evolucionan la forma de adquisición de imágenes con la implementación de cámaras múltiples. Paralelamente, se agregan nuevos subsistemas enfocados en la iluminación y la localización del módulo, este último permite optimizar el proceso de reconstrucción del entorno virtual. No obstante, generalmente estos sistemas comerciales son de alto costo y están destinados a su uso por medio de un Vehículo Operado Remotamente (ROV, por sus siglas en inglés); así, aunque en la literatura existen sistemas que permiten su uso por medio de buzos, estos reducen la profundidad de sumersión, presentan limitaciones como la reducción en el número de cámaras (usualmente tres cámaras), y limitan del desempeño técnico de los subsistemas de iluminación y localización (Nawaf et al., 2018).

1.2 Propuesta solución

A partir de la problemática presentada en la sección anterior, el presente trabajo propone el diseño de un sistema que sea capaz de trabajar en ambientes subacuáticos y que posea un sistema de cámaras para digitalizar la *data* requerida; esta información será utilizada para la virtualización de los ecosistemas submarinos turísticos. Este sistema estimará y registrará la posición relativa de las locaciones de toma de imágenes, esto con el fin proveer la ubicación de estas durante la reconstrucción virtual de los entornos y, así, reducir el tiempo de procesamiento. Por otra parte, el sistema propuesto constará de dos configuraciones para su manejo por un buzo capacitado y por medio de un ROV, este último permitirá su conexión con el módulo de adquisición para el control de sus procesos. Finalmente, debido a las condiciones desfavorables de iluminación en el medio subacuático de funcionamiento, se propone el uso de un subsistema de iluminación que permita la adquisición de imágenes y ayude en la navegación del buzo o del ROV; en la figura 1.3 se muestra un sistema que sirve para ejemplificar la propuesta solución.



Figura 1.3: Sistema para fotogrametría compuesto por tres cámaras sincronizadas (Fuente: Drap et al.).

1.3 Objetivos

En la presente sección se mostrarán el objetivo general y los objetivos específicos del trabajo de investigación, los cuales se presentan como metas necesarias para diseñar correctamente la propuesta de solución.

Objetivo general

Diseñar un sistema de obtención de imágenes submarinas por medio de cámaras para una profundidad máxima de sumersión de 750 m para que pueda ser utilizado por un vehículo submarino operado remotamente y un buzo, e implementar un prototipo enfocado en cumplir la funcionalidad y requerimientos de este último modo de uso, con el fin de utilizar estos datos recolectados para la generación de recorridos virtuales por fotogrametría.

Objetivos específicos

- Investigar acerca de las tecnologías comerciales y proyectos de investigación relacionados para obtener una visión general del estado del arte actual, identificando y comparando las características de las opciones disponibles.
- Diseñar conceptualmente el sistema propuesto, incluyendo la identificación de funciones y subsistemas, proponer tres conceptos de solución y obtener el concepto de solución óptimo mediante una evaluación técnico-económica.
- Diseñar la estructura mecánica del sistema, que involucra la estructura de soporte, elementos de conexión entre componentes y los *enclosures* de albergue, estos últimos deben ser capaces de soportar una presión de 7.6 MPa para su modo de uso por ROV. Además, elaborar los planos de despiece y ensamble respectivos.

- Seleccionar los componentes electrónicos requeridos para el funcionamiento de los subsistemas de estimación de posición, iluminación y focal. Además, diseñar los circuitos necesarios para el control de procesos y desarrollar los diagramas esquemáticos de conexión entre los elementos del sistema.
- Proponer y diseñar el algoritmo de control de iluminación, así como la interfaz de uso para el modo de operación por buzo. Del mismo modo, plantear un algoritmo que permita determinar la posición relativa del sistema durante su operación.
- Implementar un prototipo para realizar pruebas de verificación del sistema en un entorno de laboratorio.
- Analizar los costos asociados al diseño e implementación del sistema.

1.4 Metodología

Con el fin de conseguir el objetivo general del presente trabajo, el diseño conceptual del sistema se realizará mediante la metodología de diseño mecatrónico VDI 2206 y la metodología VDI 2221, que fueron desarrolladas por la Sociedad de Ingenieros Alemanes (VDI, por sus siglas en alemán). Generalmente, el proceso de diseño se divide en cuatro etapas principales a través de las cuales se realizará la propuesta inicial. Estas etapas comprenden la Comprensión del Problema, Solución Conceptual, Elaboración del Proyecto Preliminar, y Documentación y Fabricación. La descripción detallada de las etapas de diseño de muestran en el Anexo A.1.

1.5 Alcance

El presente trabajo de tesis muestra el desarrollo de un sistema submarino para adquisición de imágenes. En este sentido, se diseñará un módulo de toma de imágenes submarinas independientemente del método utilizado para su manipulación o transporte, por lo que no contará con un sistema de propulsión propio. Por ello, se propone su uso por un buzo profesional o acoplado a un ROV.

Por otra parte, el sistema debe ser capaz de albergar y proteger todos sus componentes esenciales hasta una profundidad máxima de 750 m. No obstante, se implementará la configuración de menor costo (modo de uso por buzo) con una profundidad mínima de trabajo de 60 m.

Cabe indicar que los algoritmos de procesamiento de imágenes y visión por computadora para la reconstrucción de los ambientes virtuales no se encuentran contemplados durante su funcionamiento. Además, no se considera una transmisión

de datos en tiempo real desde la ubicación de uso hasta estaciones en la superficie del mar.

Adicionalmente, el diseño de los algoritmos de estimación de desplazamiento del sistema será abordados de forma simplificada evitando la incorporación de técnicas complejas, ya que el diseño de la etapa de control está enfocado en el desarrollo del control de iluminación.

Finalmente, la implementación del prototipo solamente se centrará en la configuración de uso por buzo y, de ser necesario, se limitarán los costos involucrados en la compra de los componentes electrónicos.



CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se aborda el estado de tecnología considerado para el diseño del sistema, así como los fundamentos teóricos relacionados. En un principio se presentará las tecnologías relacionadas y a partir de ello se compararán las diferentes opciones analizando sus características y similitudes. La presentación y descripción detallada de los sistemas encontrados en la literatura se muestran en el Anexo A.3. Cabe resaltar que se incluye un breve marco teórico en el Anexo A.2.

2.1 Sistemas comerciales

A continuación, se presentan los sistemas comerciales relacionados, analizando sus características y presentando una comparación entre ellos.

2.1.1 ORUS 3D series

En el ámbito de la fotogrametría submarina, los modelos ORUS 3D desarrollados por la empresa francesa COMEX, líder mundial en fotogrametría submarina, son reconocidos como los sistemas más avanzados para aplicaciones en ingeniería civil, ciencias marinas y arqueología, entre otros (COMEX, s. f.). Estos módulos presentan un sistema de tres cámaras, una de ellas de alta resolución y dos de baja resolución, cada una con una frecuencia de muestreo que asegura la cobertura total del área para generar modelos 3D de alta precisión con una resolución de 1 mm (Drap, Merad, et al., 2015). Los modelos comerciales ORUS 3D se diferencian de acuerdo a la profundidad máxima de sumersión a la cual pueden operar (ver figura 2.1). Además, estos módulos

están destinados para su acople a ROVs o a vehículos autónomos submarinos (UAV, por sus siglas en inglés).



Figura 2.1: (a) Sistema de 300 m, (b) sistema de 3000 m, (c) sistema de 6000 m, (d) sistema para uso de buzo (Fuente: COMEX).

2.1.2 SubSLAM X2

Desarrollado por la empresa ROVCO, SubSALM X2 es un sistema inteligente de colección de *data* en tiempo real capaz de transmitir en vivo hacia cualquier dispositivo las estructuras 3D submarinas reconstruidas mediante fotogrametría con una precisión de 16 mm, y hasta una precisión de cuatro mm mediante procesamiento *offline*. Destinado para su acople con cualquier tipo de ROV (ver figura 2.2) y una profundidad máxima de sumersión hasta de 1000 m, este sistema cuenta con un sistema de doble cámara de baja sensibilidad a la luz con una resolución de 16 MP y proporción de adquisición de hasta 40 fps (ROVCO, 2019).



Figura 2.2: (a) SubSLAM X2, (b) conexión del módulo a un ROV submarino (Fuente: ROVCO).

2.1.3 Pro Squid 2

Sistema destinado a la visualización en tiempo real de los ambientes submarinos a través de la integración de una cámara en su *enclosure* ubicado en la parte central de la estructura. El primer modelo de esta serie Pro Squid fue lanzada en el año 2014, y cinco años después salió al mercado el segundo modelo que permite la incorporación de diferentes modelos de cámaras y una profundidad de operación máxima de 300 m (ver figura 2.3) (SPOTX, 2019).



Figura 2.3: Pro Squid 2 (Fuente: SPOTX).

2.1.4 Sistemas de cámaras submarinas

Uno de los módulos comerciales más utilizados para fotografía submarina de uso personal es el sistema de cámara submarina ensamblable para aplicaciones en este tipo de entornos. Este sistema permite su manejo por un buzo gracias a su reducido tamaño y simplicidad; en este sentido, el módulo está conformado por una cámara DSLR de alta resolución (hasta 20 MP) de las marcas Nikon y Canon, preferentemente adicionada a un lente *glassdome* para mejorar el acercamiento a los entornos. Debido a las diferentes combinaciones de componentes individuales que conforman el sistema, como lo son la cámara o los elementos de iluminación, no existe un modelo específico para este tipo de módulos, uno de estos sistemas se puede apreciar en la figura 2.4 (Scuba Diving, 2019).



Figura 2.4: Canon 1DX Mark II (Fuente: DPREVIEW).

2.1.5 Comparativa de sistemas comerciales

En la tabla 2.1 se puede apreciar una comparativa entre las características de los sistemas comerciales. Los productos destinados para la adquisición de imágenes de los ambientes submarinos para su reconstrucción 3D, como lo son el ORUS 3D *Series* y el SubSLAMX2, presentan en un sistema focal con más de una cámara y pueden operar a profundidades máximas superiores a 100 m.

Tabla 2.1: Comparativa entre sistemas comerciales (Fuente: Elaboración propia).

Sistema	ORUS 3D Series	SubSLAM X2	Cámaras Submarinas	Pro Squid 2
Número de cámaras	3	2	1	1
Resolución de cámara	-	Alta, hasta 16 MP	Alta, hasta 20 MP	-
Profundidad de sumersión	Hasta 6000 m	Hasta 1000 m	-	Hasta 100 m
Intensidad de iluminación (lum)	74 000	-	-	3 000
Lente utilizado	Domo	Plano	Domo	Plano
Modo de uso	Buzo y ROV	ROV	Buzo	-
Precisión en la generación de modelos	Hasta 1 milímetro	Hasta 4 mm	-	-

2.2 Proyectos de investigación

En este apartado, se mostrarán las características principales de los proyectos de investigación desarrollados y se presentará una tabla comparativa de estos.

2.2.1 Sistema submarino de visión estereoscópica

Sistema *low-cost* desarrollado con el objetivo de evaluar los requerimientos de visión subacuáticos. El módulo ha sido diseñado con un correcto balance entre consumo de energía, disipación térmica y desempeño del sistema. El sistema bifocal utiliza dos cámaras industriales AVT Mako G125C GigE con una resolución de 1.2 MP y una proporción de adquisición de 30 fps, las cuales están alojadas en dos recipientes de PVC envueltos por una cubierta de acero inoxidable. Se utiliza un contenedor de acero inoxidable que permite la sumersión hasta una profundidad máxima de 50 m para proteger los elementos electrónicos de control (ver figura 2.5) (Oleari et al., 2015).



Figura 2.5: Contenedor del sistema de control (izquierda) y Contenedores de las cámaras (derecha) (Fuente: Oleari et al.).

2.2.2 SeaArray

SeaArray es un proyecto desarrollado por una asociación entre el Servicio de Parques Nacionales (NPS, por sus siglas en inglés), ubicado en Washington D. C., y Marine Imaging Technologies (MiTech). Este sistema de fotogrametría multi cámara, posee un sistema de autopropulsión el cual es operado por un buzo (ver figura 2.6) y cuenta con un arreglo de tres cámaras Nikon Z1 de 45.7 MP para la captura de imágenes de alta resolución. El sistema modular es capaz de adquirir 10 800 imágenes por hora, lo que permite cubrir áreas en el orden de las hectáreas. Este proyecto cuenta con una estructura de fibra de carbono con brazos pivotantes construida alrededor del subsistema de propulsión; en este sentido, para la protección de las cámaras se utilizaron contenedores personalizados en conjunto con lentes Rokinon (Wright et al., 2020).



Figura 2.6: SeaArray operado por un buzo (Fuente: Wright et al.).

2.2.3 ROV 3D

El sistema ROV 3D fue diseñado para ser montado en un vehículo subacuático de bajo peso controlado remotamente, el cual fue optimizado en tamaño y peso para su

ensamble. Durante su funcionamiento el operador es capaz de acceder a su unidad de adquisición a bordo vía conexión Ethernet (Drap, Seinturier, et al., 2015). Este sistema posee una cámara a 2 Hz AVT PROSILICA GT6600 de alta resolución (hasta 28.8 MP) y dos cámaras a 10 Hz AVT PROSILICA GT1920 de baja resolución (hasta 2.8 MP), las cuales están montadas en contenedores separados que las aíslan del agua y se conectan a la unidad de control encapsulada en un contenedor adicional (ver figura 2.7). Así, para obtener imágenes con adecuada iluminación, se usó un subsistema de iluminación basados en un diodo emisor de luz (LED, por sus siglas en inglés) controlado por la unidad de control (Drap, Merad, et al., 2015).



Figura 2.7: Imágenes del sistema conectado al Rémora 2000 ROV (a) lista de las tres cámaras sincronizadas, (b) vista del subsistema de control encapsulado (Fuente: Drap, Merad, et al.).

2.2.4 Sistema trifocal acoplable

Basado en el BlueROV2 de la empresa BlueRobotics, el sistema cuenta con un *enclosure* cilíndrico (34×15 cm) el cual contiene tres Raspberry-Pi, cada una conectada a una cámara Sony IMX219 con una resolución de 8 MP (ver figura 2.8). Cabe resaltar que no cuenta con un subsistema de iluminación propio, pues es un encapsulado destinado a su acople con el BlueROV2 para las labores de recolección de data y generación de modelos 3D mediante fotogrametría (Nawaf et al., 2018).



Figura 2.8: Sistema trifocal acoplado al BlueROV2 (Fuente: Nawaf et al.).

2.2.5 Sistema manual de visión estereoscópica

Se basa en un *enclosure* cilíndrico único que alberga dos Raspberry-Pi, cada una conectada a una cámara que forma un par para estereovisión (ver figura 2.9). Las cámaras están sincronizadas mediante el uso de hardware que asegura el disparo simultáneo de los dos sensores. Ambas Raspberry-Pi están conectadas mediante conexión Ethernet hacia la superficie. Adicionalmente, se adiciona un monitor, el cual está conectado a una de las computadoras, y permite visualizar la información sensada por las cámaras en tiempo real (Nawaf et al., 2018).



Figura 2.9: Sistema de estereovisión portátil (Fuente: Nawaf et al.).

2.2.6 Comparativa de proyectos de investigación

A continuación, se muestra en la tabla 2.2 una comparativa de los proyectos mencionados, donde se puede apreciar que se utiliza en su mayoría tres cámaras. Adicionalmente, se observa que todas las estructuras de protección de componentes presentan una geometría cilíndrica y se le adiciona en su mayoría puertos tipo domo para el lente de la cámara. Finalmente, se puede deducir que se prefiere el uso de materiales ligeros como el PVC, acrílico y aluminio.

Tabla 2.2: Comparativa entre proyectos de investigación (Fuente: Elaboración propia).

Sistema	<i>Stereo Vision System</i>	<i>SeaArray</i>	ROV 3D	<i>Attached trifocal System</i>	<i>Handheld stereo system</i>
Número de cámaras	2	3	3	3	2
Resolución de cámaras (MP)	1.2	45.7	28.8 / 2.8	8	-
Lente utilizado	Plano	Domo	Domo	-	Plano
Controlador	Core x86	Personalizado	-	Raspberry-Pi	Raspberry-Pi
Modo de uso	Buzo	Buzo	ROV	ROV	Buzo
Tipo de carcasa contenedora	Acero inoxidable y PVC	Cilindros con perfiles de CFRP	Cilindros de aluminio	Cilindro de acrílico	Cilindro de aluminio

2.3 Patentes

A continuación, se presentarán las patentes existentes de sistemas relacionados.

Underwater acquisition of imagery for 3D mapping environments

Este sistema de adquisición de imágenes panorámicas puede desplegarse bajo el agua y estabilizarse para reducir los efectos del movimiento de un vehículo en operaciones submarinas. Se utiliza un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) para recopilar los datos de posicionamiento. Finalmente, se puede adquirir datos adicionales y asociarlos con las imágenes panorámicas, incluidos los datos topográficos adquiridos por un sensor Lidar (BAIRD, 2011). La representación del sistema se puede apreciar en la figura 2.10.

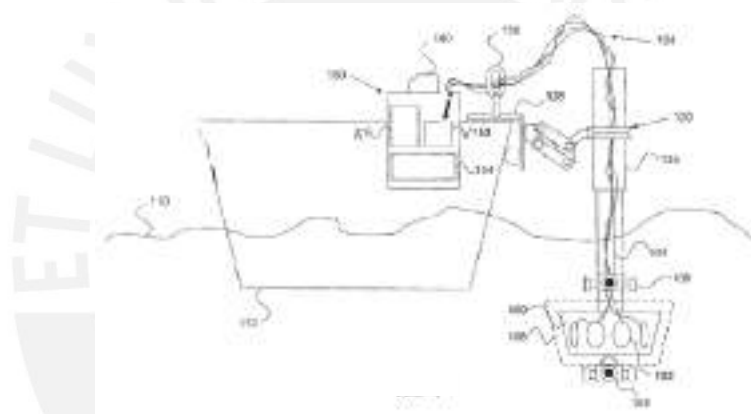


Figura 2.10: Patente del sistema de adquisición de imágenes panorámicas
(Fuente: BAIRD).

Image capturing apparatus with clarity sensor, underwater image compensation and underwater flash compensation

Este aparato de captura de imágenes incluye un marco, un sistema de captura y un sensor de claridad. El sensor de claridad proporciona una señal de claridad del fluido presente en el ambiente. El aparato de captura de imágenes también incluye un sistema de control que maximiza la señal de claridad para ajustar una composición de color de la imagen capturada. En este sentido, el sistema de control puede ajustar la composición de color de la imagen captada para compensar la luz atenuada por el fluido. Adicionalmente, el sistema de control puede calcular una atenuación de la luz en función de la profundidad del aparato, la distancia de la sección y el tipo de fluido. El sistema también cuenta con un sistema de almacenamiento para registrar las

imágenes capturadas, la señal de claridad, la profundidad del sistema, el tipo de fluido y el tiempo transcurrido hasta la captura. El sistema de iluminación implementado cuenta con dos emisores de luz de diferentes colores que son controlados para ajustar una composición de color del haz de luz generado basándose en la claridad del fluido. Finalmente, el sistema puede incluir la opción de control por un usuario (Park et al., 2010). El sensor de claridad (27), el sistema de adquisición (22) y el sistema de iluminación (22) se pueden apreciar en la figura 2.11.

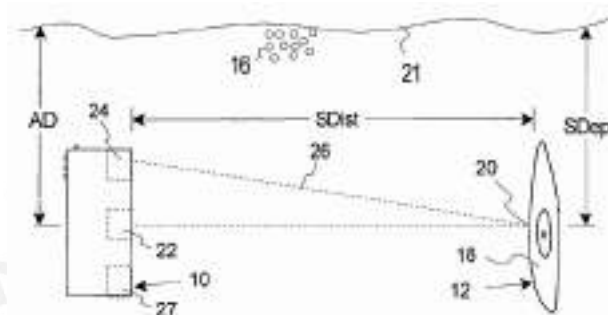


Figura 2.11: Representación del sistema con sus componentes principales

(Fuente: Park et al.).

Multi-camera inspection of underwater structures

El sistema permite visualizar y obtener imágenes de estructuras submarinas desde una plataforma sumergible. Este sistema debe navegar a lo largo de la estructura para construir el mapa en forma de fotomosaico y mapa estructural tridimensional. Se incluye dos cámaras acopladas y una lógica de coincidencia de estereovisión programada para simular una vista frontal de una estructura submarina objetivo desde una distancia fija. Las cámaras pueden montarse en la parte delantera o lateral de la plataforma sumergible y pueden incluir cámaras ópticas, cámaras acústicas o ambas. Preferiblemente, la plataforma sumergible puede ser un ROV o UAV. Finalmente, el sistema puede incluir sensores de posicionamiento absoluto (SHAHRIAR & FEZHMAN, 2005).

CAPÍTULO 3

DISEÑO CONCEPTUAL

En este capítulo se presentan los requerimientos necesarios, esto con el fin de definir las funciones del sistema y a su vez plantear los conceptos de solución. Estas soluciones serán evaluadas por medio de criterios técnicos y económicos para, posteriormente, optimizar y obtener el concepto de solución óptimo, el cual se desarrollará en los últimos incisos de capítulo.

3.1 Requerimientos del sistema

La lista que resume los requerimientos del sistema se presenta adjunta en el Anexo A.4. La función principal del sistema es adquirir y registrar imágenes submarinas y su posición relativa de obtención para una posterior generación de modelos submarinos mediante fotogrametría. A continuación, se describirán los requerimientos mecánicos, electrónicos, eléctricos, de control y otros.

3.1.1 Requerimientos mecánicos

- **Masa:** Se observa que los sistemas para uso por buzo presentados en capítulos anteriores poseen características que permiten reducir su masa total. Esto facilita la manipulación y transporte del sistema en los entornos submarinos, genera un menor grado de fatiga al buzo y amplía el tiempo de sus actividades. En este sentido, para las prácticas de buceo es recomendable cargar al rededor del 10 % - 15 % del peso total de la persona que realizará la actividad (Dive&more, 2015). Entonces, tomando como referencia la masa promedio de un hombre adulto en

Perú (75.3 kg), se puede deducir que la masa máxima no debe sobrepasar los 9 kg (NCD-RISK, 2017).

- **Geometría:** La distancia máxima entre los elementos de sujeción para el modo de uso por buzo no debe superar los 0.50 m de acuerdo a la distancia hombro a hombro estándar en Perú (Salazar et al., 2018). Por ello, con el fin de desarrollar un sistema compacto, las dimensiones máximas de sistema no deben ser mayores a $0.45 \times 0.40 \times 0.40$ m (Largo \times Ancho \times Alto).
- **Fuerzas:** El sistema debe operar a una profundidad de sumersión mínima de 60 m y máxima 750 m para el uso por buzo (prototipo a desarrollar) y por ROV, respectivamente (DIVENIN, s. f.). En este sentido, la presión máxima de trabajo es de 7.6 MPa.
- **Cinemática:** La velocidad máxima de traslación del sistema debe ser de 2 m/s.
- **Transporte:** La caja de transporte con carga útil, concerniente al sistema total, debe tener una masa máxima de 10 kg y debe tener dimensiones máximas de $0.5 \times 0.8 \times 0.8$ m (Largo \times Ancho \times Alto).
- **Seguridad:** La estructura debe permitir un aislamiento completo de los componentes electrónicos utilizados. Entre los materiales presentados en la literatura, se proponen el uso de las aleaciones de aluminio (véase la norma ASTM B308 / B308M para el Al 6061-T6), titanio (véase la norma ASTM F1472 para Ti-6Al-4V) y materiales compuestos (véase la norma ISO 14127:2008 para compuestos reforzados con fibra de carbono) (Ross, 2006).
- **Operación:** El sistema está destinado para su operación en ambientes submarinos presentes en el litoral peruano costeros hasta una profundidad de 750 m, por lo que la temperatura de trabajo a la cual operará se encuentra entre el rango de 4 – 18 °C (Walsh, s. f.).
- **Montaje:** El sistema debe ser modular y permitir su ensamble mediante uniones atornilladas para su uso por un buzo o por un ROV.

3.1.2 Requerimientos eléctricos y electrónicos

- **Sensores:** El sistema debe tener por lo menos un sensor de imagen con una resolución mínima de 1.2 MP, resolución mínima encontrada de los sistemas presentados en la literatura, que le permita adquirir la información del ambiente (Oleari et al., 2015).

- **Sensores:** El sistema debe contar con sensores que le permitan estimar y registrar su posición y orientación relativas.
- **Sensores:** El sistema debe contar con sensores que le permitan detectar el ingreso del agua a los módulos que contengan los elementos electrónicos
- **Sensores:** El sistema debe contar con sensores para obtener información sobre la profundidad de sumersión en tiempo real.
- **Almacenamiento:** El sistema debe presentar dispositivos electrónicos para el almacenamiento de las imágenes y la localización relativa de adquisición de estas.
- **Procesamiento:** El controlador debe poseer la capacidad computacional para estimar la posición y orientación relativas del sistema.
- **Procesamiento:** El controlador debe poseer la capacidad computacional para procesar y gestionar las imágenes sensadas.
- **Procesamiento:** El controlador debe contar con la suficiente capacidad computacional para controlar las luces submarinas.
- **Procesamiento:** El controlador debe contar con la suficiente capacidad computacional para controlar el visualizador de información, mostrando datos del entorno y del sistema, en todo su tiempo de operación.
- **Procesamiento:** El controlador debe contar con la capacidad de monitorear en todo instante el ingreso de agua al sistema por medio del sensor de ingreso de agua.
- **Operación:** El sistema debe poseer la capacidad de obtener la información en simultáneo de las cámaras.
- **Operación:** El sistema debe recibir instrucciones por medio de componentes de activación para la toma de datos durante su uso por buzo y por ROV.
- **Actuadores:** El sistema debe iluminar el entorno submarino debido a sus condiciones desfavorables. Por ello, el sistema debe contar con actuadores que le permitan generar iluminación artificial mínima de 3000 lumens.
- **Energía:** El almacenamiento debe ser por baterías y debe permitir la autonomía del sistema por 30 minutos.
- **Energía:** En el modo de uso por ROV, con fin de aumentar el tiempo de funcionamiento del sistema y evitar el sobreuso de la batería, la alimentación de los actuadores debe ser proporcionada por el ROV.

3.1.3 Requerimientos de *software*

- **Software:** El sistema debe contar con la implementación de un algoritmo para el control del subsistema de iluminación en función de la profundidad de sumersión y la iluminación total adquirida en las imágenes.
- **Software:** El sistema debe permitir la estimación de la posición y orientación en tiempo real del sistema por medio de algoritmos de control.

3.1.4 Otros requerimientos

- **Señales:** Se debe indicar los estados del sistema (Sistema en operación, Función de recolección, Ingreso de agua al sistema y Batería baja) por medio de indicadores luminosos.
- **Seguridad:** El sistema debe contar con un elemento de apagado inmediato en caso se detecte el ingreso de agua u otro tipo de emergencias.
- **Comunicación:** Durante su uso por ROV, el sistema debe intercambiar la información bidireccionalmente por medio de una conexión alámbrica con una longitud mínima de 2 m.
- **Visualización:** Durante su uso por buzo, se debe visualizar la información adquirida por los sensores de imagen. Por ello, es necesario el uso de un visualizador y una interfaz que proporcione una realimentación del entorno sentido.
- **Fabricación:** Como se pudo apreciar en los capítulos anteriores, los materiales utilizados deben presentar bajo peso y alta resistencia a la oxidación. Para la fabricación de piezas con geometrías complejas se propone el uso de manufactura aditiva y la conexión entre los elementos mecánicos debe ser mediante uniones atornilladas. Se propone el torneado para elementos cilíndricos. Finalmente, se estima que la tolerancia de fabricación sea de 1 milímetro.
- **Mantenimiento:** El mantenimiento preventivo de los componentes mecánicos y electrónicos debe realizarse mensualmente.
- **Ergonomía:** El diámetro del elemento que permite la sujeción del objeto debe estar comprendido entre 30 y 50 mm para permitir mayor torque en el agarre. La longitud de este elemento debe ser mayor a 120 mm para su sujeción con uso de guantes, esto para evitar la compresión en la parte media de la palma. Finalmente,

para asegurar una sujeción correcta del sistema, el área de contacto debe estar hecha de material antideslizante, no conductor y comprimible (CCOHS, 2021).

- **Costos:** Se propondrán dos diseños, uno estará enfocado a su uso por buzo y el otro a su uso mediante un ROV. En este sentido, se implementará la versión más económica con un presupuesto máximo de 15 000 USD para su fabricación.
- **Plazos:** Se propone un plazo de diseño y verificación de ocho meses seguido de dos meses de fabricación y pruebas en un entorno de laboratorio.

3.2 Estructura de funciones

En este apartado se presentará la caja negra (*black box*, por su denominación en inglés), la cual muestra las entradas y salidas del sistema completo como un bloque. Además, se presentan las funciones internas del sistema a desarrollar en un diagrama que representa gráficamente la conexión entre estos procesos y cómo se relacionan las entradas y salidas.

3.2.1 Caja negra

En la figura 3.1 se muestra el diagrama de caja negra del sistema, en el cual se utilizan diferentes tipos de flechas de acuerdo su naturaleza. La flecha continua representa al flujo de energía, el intercambio de información se representa con flechas discontinuas y la entrega de materia es representada con las flechas gruesas. La descripción detallada de cada entrada y salida se presenta en el Anexo A.4.

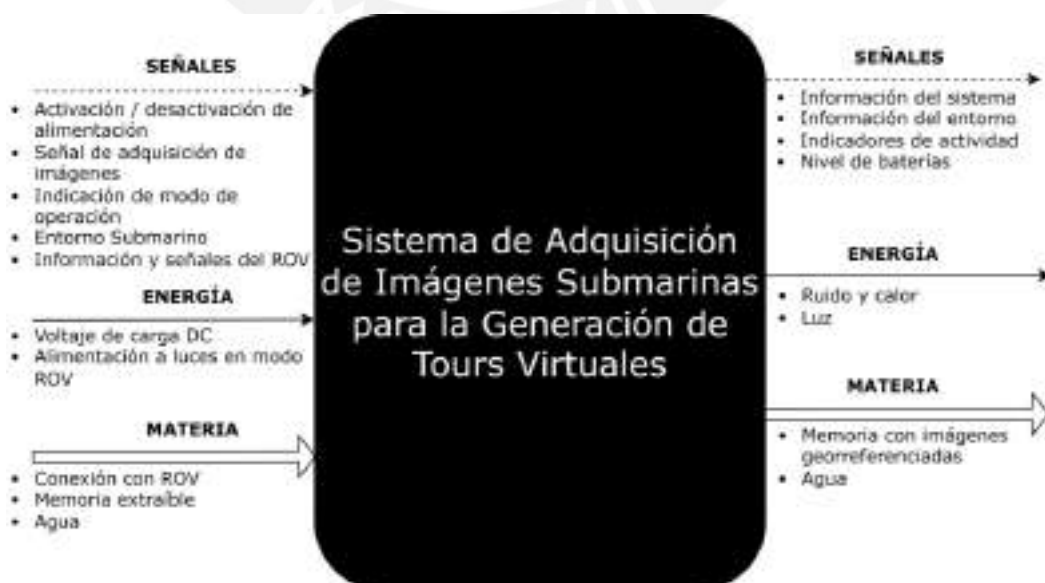


Figura 3.1: Caja negra del sistema (Fuente: Elaboración propia).

3.2.2 Funciones del sistema

En la figura 3.2 se puede observar el diagrama de funciones total del sistema. Los bloques de color rojo conforman el subsistema de adquisición de imágenes, el subsistema de estimación de posición y orientación está representado por los bloques de color plomo y el subsistema de iluminación por el color amarillo. Los demás bloques corresponden a las tareas realizadas por el sistema en general. Para posibilitar una mejor visualización, algunas flechas han sido pintadas de diferente color. Cabe resaltar que la descripción de los procesos involucrados se muestra en el Anexo A.4.



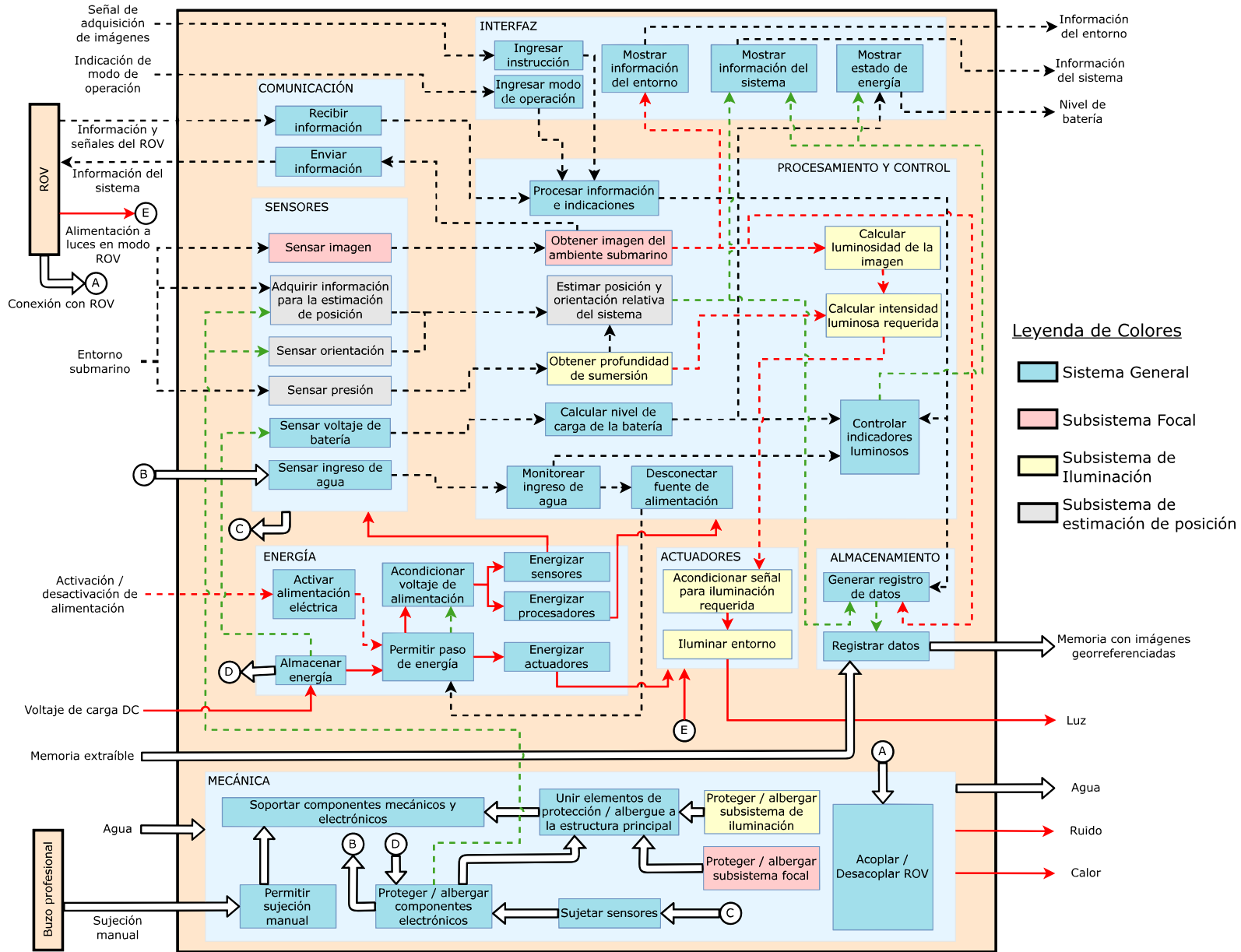


Figura 3.2: Diagrama de funciones del sistema (Fuente: Elaboración propia).

3.3 Matriz morfológica

A partir de la literatura revisada en el estado del arte y la estructura de funciones desarrollada en la sección anterior, se desarrolla la matriz morfológica por cada dominio del sistema, en la cual se presentan las soluciones tecnológicas de *hardware* y *software* que realicen una función específica. La matriz completa y con las imágenes que muestran los portadores de solución de las funciones se presenta en el Anexo A.4. Así, a partir de la matriz morfológica es posible plantear tres posibles soluciones que cumplan con las especificaciones y funciones operativas descritas anteriormente.

3.3.1 Dominio de procesamiento y control

En las tablas 3.1 y 3.2 se presentan las matrices morfológicas que contienen los portadores de solución (*software* y *hardware*) por cada función del dominio de procesamiento y control para los tres conceptos propuestos. Por otra parte, debido a que las soluciones de *hardware* generalmente no poseen *hardware* especializado para el control de elementos de manejo de potencia (señal PWM y analógicas), se utilizará un microcontrolador adicional para la generación y recepción de estas señales.

Tabla 3.1: Matriz morfológica del dominio de procesamiento y control – hardware
(Fuente: Elaboración propia).

Procesamiento y Control: Hardware			
Funciones	Soluciones		
	1	2	3
Procesar información e indicaciones	Procesador de Placa Única (SBC) para propósito general	Procesador de Placa Única (SBC) optimizada para manejo y procesamiento gráfico	
Obtener imagen del ambiente submarino			
Estimar posición y orientación relativa			
Obtener profundidad de sumersión			
Estimar nivel de batería			
Calcular luminosidad de la imagen			
Calcular intensidad luminosa requerida			
Monitorear ingreso de agua			
Controlar indicadores luminosos	Uso de puertos del microcontrolador y componentes electrónicos		Driver para LEDs
Desconectar fuente de alimentación	Interrupción por circuitos de almacenamiento de estados		Circuitos de apagado permanente

Tabla 3.2: Matriz morfológica del dominio de procesamiento y control – software

(Fuente: Elaboración propia).

Procesamiento y Control: Software			
Funciones	Soluciones		
	1	2	3
Procesar información e indicaciones	Uso de interrupciones e identificación de conexión		Uso de interrupciones y lógica booleana
Obtener imagen del ambiente submarino	Procesamiento de imagen en calidad reducida	Procesamiento de imagen en calidad real	
Estimar posición y orientación relativa	Navegación por estima	Cálculo del tiempo de recepción de señales	Odometría visual
Obtener profundidad de sumersión	Cálculo de acuerdo a la presión de trabajo		
Calcular nivel de batería	Estimación de acuerdo a la lectura de voltaje		
Calcular luminosidad de la imagen	Promedio de luminosidad de píxeles	Uso de histograma de luminosidad de píxeles	Conteo de píxeles en imagen binarizada por un umbral
Calcular intensidad luminosa requerida	Función lineal de luminosidad y profundidad	Función no lineal de luminosidad y profundidad	
Controlar indicadores luminosos	Apagado y encendido directo		Control con PWM
Desconectar fuente de alimentación	Lógica booleana		

3.3.2 Dominio de sensores

En la tabla 3.3 se muestra la matriz morfológica del dominio de sensores. Para la adquisición de las imágenes existen tecnologías que difieren en la incorporación de protección ante el ambiente submarino. Así, para los portadores de solución de la función de adquisición de información y para la estimación de posición se presentan tecnologías que van en concordancia con las soluciones tipo software para estas funciones presentada en el inciso anterior. En este sentido, la unidad de medición inercial propuesta en la solución 2 debe poseer relativamente alta resolución, alta frecuencia de muestreo y reducido ruido para que, a través de los algoritmos de navegación por estima, la posición y orientación estimadas sean más precisas en un tiempo prolongado del uso de este algoritmo. Cabe precisar que, debido a que la velocidad de traslación y giro serán reducidas durante el movimiento del sistema (durante su uso por buzo o ROV), no es necesario que el rango de sensado de la Unidad de Medición Inercial (IMU, por sus siglas en inglés) sea amplio.

Tabla 3.3: Matriz morfológica del dominio de sensores (Fuente: Elaboración propia).

Sensores			
Funciones	Soluciones		
	1	2	3
Sensar imagen	Uso de múltiples cámaras sumergibles	Uso de múltiples cámaras no sumergibles	
Adquirir información para la estimación de posición	Unidad de medición inercial de 9 ejes Giroscopio	USBL	Cámara
Sensar orientación		Giroscopio de 3 ejes	Giroscopio de 6 ejes
Sensar presión	Sensor de presión para aplicaciones submarinas		
Sensar voltaje de batería	Convertor analógico-digital del microcontrolador		
Sensar ingreso de agua	Sensor de fuga		

Por otra parte, la cámara utilizada para el uso de algoritmos de odometría visual debe presentar una frecuencia de muestreo igual o superior a la frecuencia de respuesta de este algoritmo con el fin de estimar la posición con un tiempo de respuesta mínimo. Finalmente, debido a que la profundidad máxima de trabajo debe ser hasta 750 m, como se indicó en los requerimientos del sistema en la sección 3.1, el sensor de presión debe posibilitar el sensado de presiones hasta 7.60 MPa.

3.3.3 Dominio mecánico

En la tabla 3.4 se presenta la matriz morfológica del dominio mecánico. Como se apreció en el capítulo 2, la mayoría de sistemas relacionados hacen uso de *enclosures* cilíndricos para albergar los sistemas de cámaras no sumergibles y componentes electrónicos; por ello, se propone el uso de ellos en las diferentes soluciones propuestas. Por otra parte, se plantean dos soluciones para el diseño del subsistema de iluminación, las cuales implican el uso de luces para ambientes submarinos y el diseño propio de emisores de luz encapsulados en un *enclosure* para su aislamiento del ambiente subacuático. Por otro lado, se propone la fabricación de diferentes piezas de conexión y acoples por manufactura aditiva debido a su posible complejidad geométrica.

Tabla 3.4: Matriz morfológica del dominio mecánico (Fuente: Elaboración propia).

Mecánica			
Funciones	Soluciones		
	1	2	3
Permitir manipulación manual	Tubo de material resistente a la corrosión	Manija fabricada por manufactura aditiva	Manubrio comercial
Sujetar sensores	Sujeción mediante uniones atornilladas a bandeja plana		Sujeción mediante uniones atornilladas a estructura multinivel
Proteger y albergar componentes electrónicos	Enclosure cilíndrico		
Proteger y albergar subsistema de iluminación	Protección incorporada para luces submarinas		Enclosure cilíndrico con puerto plano
Proteger y albergar subsistema focal	Protección incorporada para cámaras submarinas	Enclosure cilíndrico con puerto tipo domo	
Unir elementos de protección / albergue a estructura principal	Unión atornillada usando elementos de conexión impresos en 3D		Unión por medio de planchas dobladas
Soportar componentes mecánicos y electrónicos	Estructura por medio de planchas dobladas	Estructura hecha de perfiles estructurales	Estructura impresa en 3D
Acoplar / desacoplar ROV	Unión directa por tornillos	Acople por uniones atornilladas y elementos impresos en 3D	Acople por plancha con uniones atornilladas

3.3.4 Dominios eléctricos: energía, actuadores, interfaz y almacenamiento

En la tabla 3.5 se presenta la matriz morfológica de los dominios eléctricos. Como se mencionó en las soluciones de software para la función de procesamiento de indicación del modo de operación (buzo o ROV), por parte de las soluciones 1 y 2, esta se basa en la identificación de los comandos que recibirá el sistema por medio de la conexión alámbrica que lo conecta el ROV. Así, si no se detecta alguna indicación, se establecerá el modo de operación por buzo.

Tabla 3.5: Matriz morfológica de los dominios eléctricos (Fuente: Elaboración propia).

Energía, actuadores, interfaz y almacenamiento				
Funciones		Soluciones		
		1	2	3
Energía	Almacenar energía	Batería de ion de litio		Batería de polímero de iones de litio
	Energizar actuadores (buzo)			
	Activar alimentación eléctrica	Switch submarino		Pulsador submarino
	Acondicionar voltaje de alimentación	Elevador de voltaje	Reductor de voltaje	
	Energizar procesadores			
	Energizar sensores			
Permitir paso de energía	Interruptor electromagnético			
Actuadores	Acondicionar señal para iluminación requerida	Driver incorporado		Driver para LEDs
	Iluminar entorno	Luces submarinas		Arreglo de LEDs
Interfaz	Ingresar instrucción	Switch submarino		Pulsador submarino
	Ingresar modo de operación	Indicación mediante la conexión alámbrica con el ROV		Switch submarino
	Mostrar información del entorno	Pantalla TFT + Indicadores submarinos		Pantalla LCD + Indicadores submarinos
	Mostrar energía restante			
	Mostrar información del sistema			
Almacenamiento	Generar registro de datos	Procesador de Placa Única (SBC) para propósito general	Procesador de Placa Única (SBC) optimizada para manejo y procesamiento gráfico	
	Registrar datos	Memoria micro SD	Memoria externa	

3.4 Concepto de solución óptimo

Se seleccionó el segundo concepto como base a partir de la evaluación técnico-económica solución (véase Anexo A.4 para el detalle de los conceptos de solución y la evaluación técnico-económica), en este inciso se mejorará la propuesta introduciendo un IMU para utilizar el método de navegación por estima. Se utilizan sujetadores fabricados por manufactura aditiva basándose en las recomendaciones ergonómicas descritas en la lista de exigencias. Así, se posicionaron los indicadores luminosos y *switches* de activación de registro de imágenes georreferenciadas en los *enclosures* secundarios para que puedan ser alcanzados y accionados fácilmente por el operario.

3.4.1 Modelo 3D preliminar

En las figuras 3.23, 3.24 y 3.25 se presentan los modelos 3D que indican los componentes del sistema general e interior de los *enclosures*.

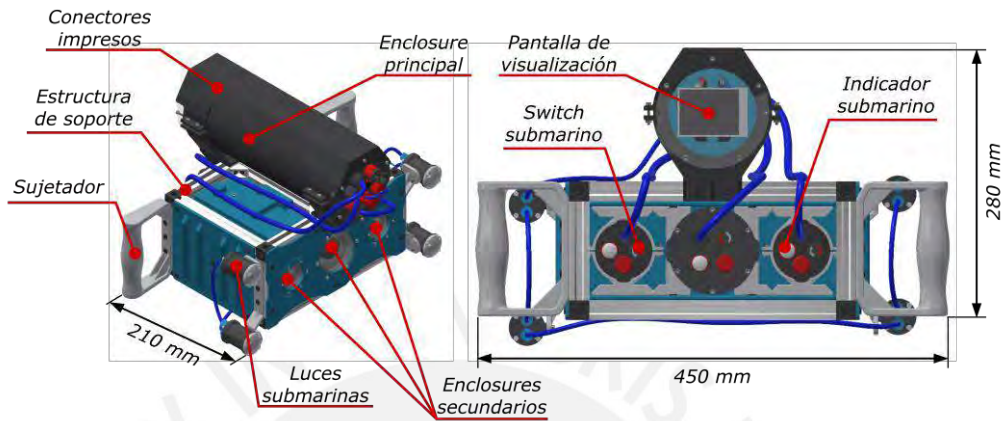


Figura 3.3: Esquema del sistema general (Fuente: Elaboración propia).

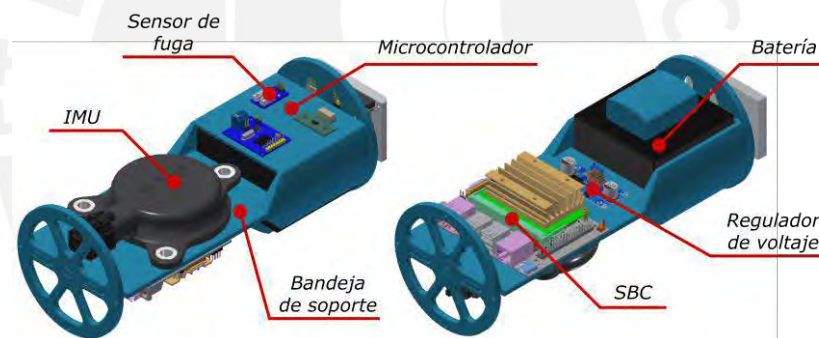


Figura 3.4: Esquema de la distribución de componentes electrónicos en el *enclosure* principal (Fuente: Elaboración propia).

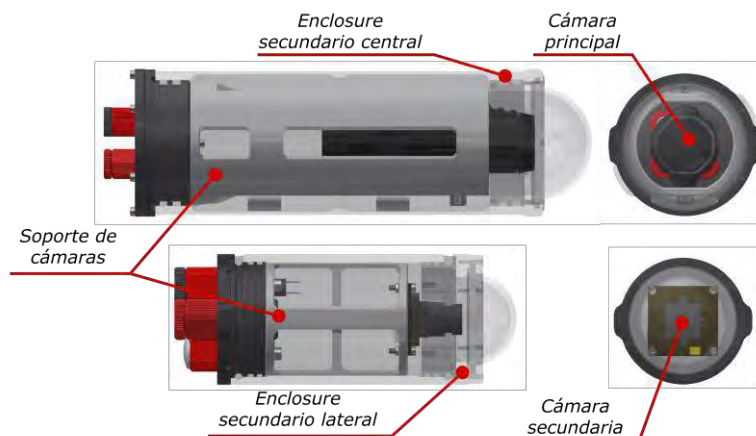


Figura 3.5: Esquema de los *enclosures* secundarios (Fuente: Elaboración propia).

En la figura 3.6 se muestra el sistema en su modo de uso por buzo (imagen derecha), donde se puede visualizar el tamaño del sistema con respecto a una persona de estatura igual a 1.85 m. En este modo, la forma de traslado del sistema lo debe realizar el buzo el cual debe sostener al sistema por medio de los sujetadores unidos a la estructura ubicados en la zona lateral del sistema. Además, se puede apreciar el sistema en su modo de uso por ROV (imagen izquierda), en esta ocasión se ha tomado como modelo el BlueROV2 de la empresa BlueRobotics. Como se mencionó con anterioridad, se propone la conexión entre el ROV y el sistema por medio de estructuras fabricadas por manufactura aditiva y uniones atornilladas. Finalmente, el *enclosure* principal se situará en la parte inferior de la estructura de soporte y el sistema se acoplará en la parte inferior del ROV.

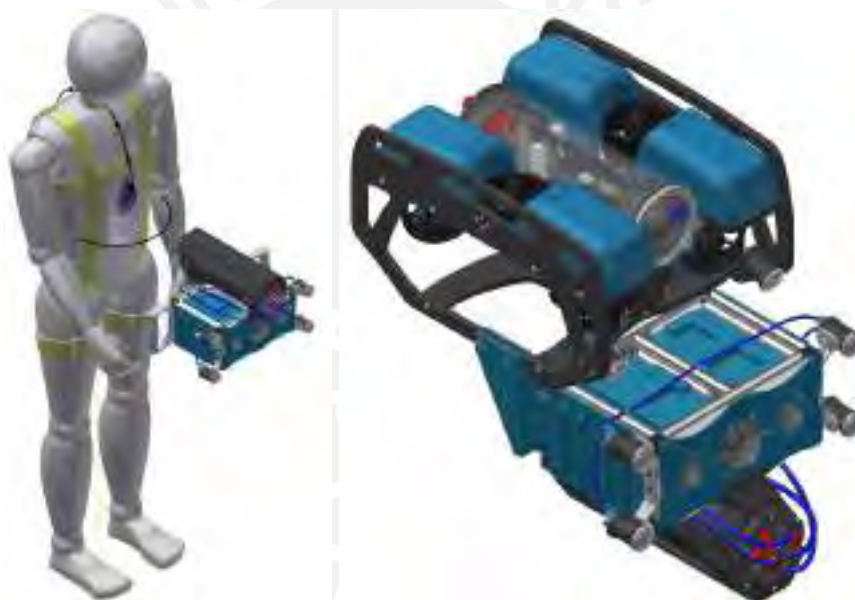


Figura 3.6: Diseño conceptual del sistema en su modo de uso por buzo (izquierda) y ROV (derecha) (Fuente: Elaboración propia).

3.4.2 Diagrama de bloques

En la figura 3.7 y 3.8, se muestran los diagramas de bloques del sistema en sus dos configuraciones (buzo y ROV), los cuales que permite visualizar de manera gráfica las interacciones los diferentes elementos. Se puede observar que en el *enclosure* principal se encuentran los elementos electrónicos y eléctricos, entre los cuales se tienen la batería, regulador de voltaje, conversor analógico-digital (ADC, por sus siglas en inglés), IMU, sensor de fuga, sensor de presión, pantalla LCD y controlador.

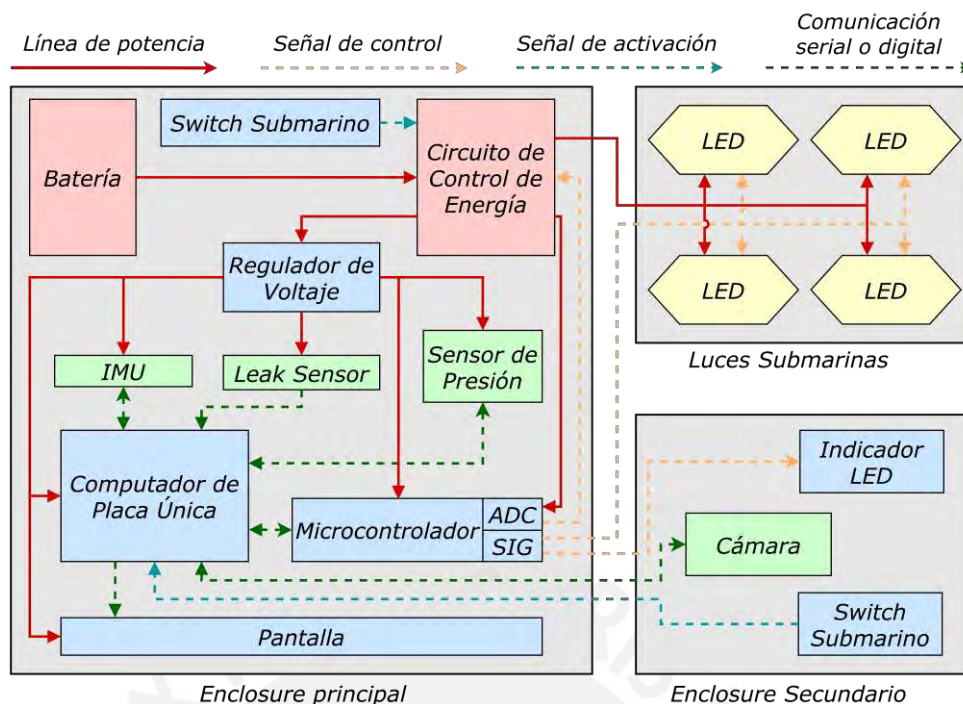


Figura 3.7: Diagrama de bloques del sistema – buzo (Fuente: Elaboración propia).

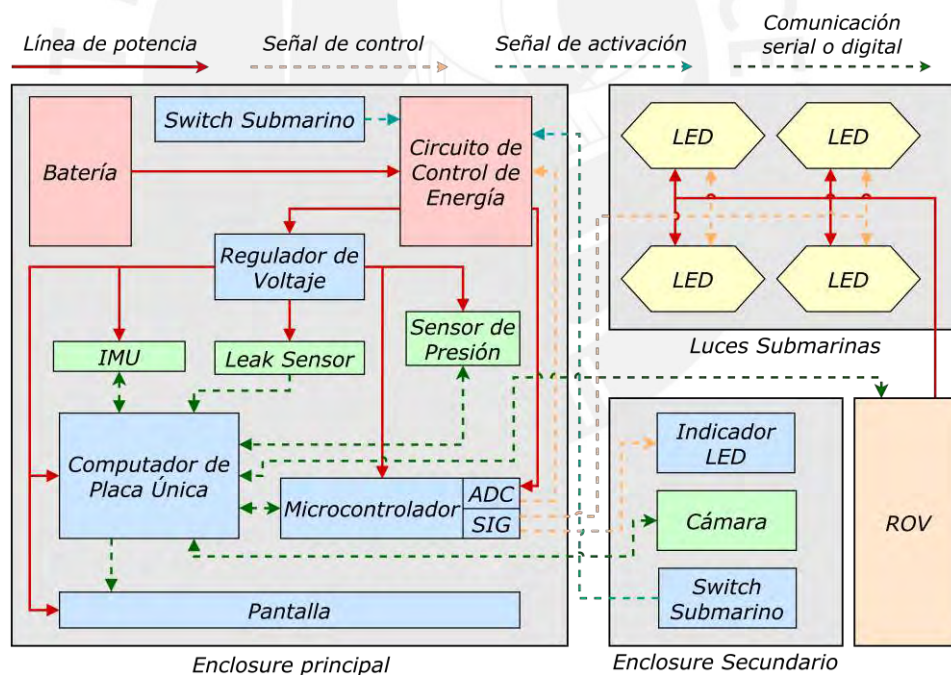


Figura 3.8: Diagrama de bloques del sistema – ROV (Fuente: Elaboración propia).

Por otra parte, este *enclosure* cuenta con diferentes conectores para establecer una conexión con los indicadores submarinos y los *enclosures* secundarios. Se cuenta con un *switch* que activará/desactivará la alimentación general del sistema (*switch* principal) y otro que activará la el accionamiento lógico del circuito de control por

almacenamiento de estados (*switch* de energía). En este sentido, si el *switch* principal es desactivado, se espera que el circuito de control se reinicie. En los *enclosures* secundarios se encontrarán los *switches* que servirán para activar el registro de imágenes georreferenciadas y cambiar de información en la pantalla LCD. Además, los indicadores luminosos que se activarán de acuerdo al estado y funcionamiento del sistema se encuentran en los *enclosures* secundarios.

Por otra parte, si es necesario en el modo de uso por ROV, los *switches* submarinos de los *enclosures* principales serán utilizados para controlar la alimentación del sistema. Finalmente, en el *enclosure* principal se cuenta con un conector que permite una conexión alámbrica para el intercambio bidireccional de información cuando el modo de operación sea por ROV. Finalmente, cabe resaltar que los diagramas de flujo adicionales que respectan al diseño conceptual de sistema de adquisición de imágenes submarinas se muestran en el Anexo A.4.



CAPÍTULO 4

DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA

El presente capítulo desarrollará el diseño mecánico del sistema de adquisición de imágenes submarinas. Se abordará el diseño de la estructura principal, *enclosures*, elementos de conexión y sujeción de componentes. Por otra parte, se analizará el rango efectivo de toma de imágenes de acuerdo a la dispersión de la luz y enfoque, y la superposición entre las imágenes adquiridas relacionada a la distribución de las cámaras. Cabe resaltar que todas las simulaciones realizadas en el software Inventor se han reducido a la aplicación de fuerzas en las zonas de análisis especificadas sin considerar la reacción fluido-componente. Y el factor de seguridad mínimo admisible es 1.2 considerando al esfuerzo de fluencia como el esfuerzo máximo permitido.

4.1 Diseño de la estructura de soporte

En este apartado se desarrollará el diseño mecánico de la estructura de soporte la cual tiene como función principal proveer rigidez y estabilidad al sistema durante su operación en ambos modos de operación. Esta estructura será la encargada de sostener los *enclosures* de albergue de componentes, luces submarinas y elementos que permitan la sujeción del buzo.

4.1.1 Análisis y selección de materiales

Como se pudo apreciar en la literatura revisada en el capítulo 2 de la presente tesis, los sistemas submarinos relacionados utilizan materiales resistentes con las siguientes características: capacidad de soportar presión externa elevada, resistencia a la

corrosión, alta relación resistencia-peso, facilidad de fabricación y vida útil del material (Ross, 2006). Así, los materiales ampliamente usados se basan en los aceros de alta resistencia, aleaciones de aluminio, aleaciones de titanio y materiales compuestos. En la tabla 4.1 se aprecia las características generales de algunos de los materiales más utilizados por cada categoría.

Tabla 4.1: Características de los materiales propuestos (Fuente: Elaboración propia).

Denominación	Material	Densidad (kg/m ³)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Costo (\$/kg)
HY80	Acero de alta resistencia	7.8	550	4.19
6061-T6	Aleación de aluminio	2.8	276	3.74
6-4 alloy (annealed)	Aleación de titanio	4.5	827	86.5
GFRP (Epoxy/S-glass filament wound)	Material compuesto	2.1	1000	39.76
CFRP (Epoxy/HS filament wound)	Material compuesto	1.7	1000	77.35

Debido a que se requiere que el sistema posea un peso ligero, se requiere que los materiales utilizados no posean una densidad relativamente elevada. Por otra parte, el sistema propuesto debe ser de bajo costo, por lo que se optará por el uso de materiales de costo por kg reducido. Por ello, se utilizará el aluminio 6061-T6 como material principal para el diseño de la estructura de soporte y los *enclosures* que protegerán a los componentes electrónicos. No obstante, debido a las propiedades ventajosas que presenta la fibra de carbono se utilizará este material como refuerzo en conjunto con polímeros para la fabricación de los elementos de geometría compleja por manufactura aditiva.

Para el diseño de la estructura de soporte principal se utilizará el perfil V-SLOT, el cual es un perfil estructural hecho de aluminio 6061-T6, comúnmente usado en aplicaciones de sistemas modulares que exigen ligereza y rigidez. Asimismo, este componente mecánico está disponible en el mercado local lo cual facilita su obtención y reduce el costo de importación involucrado. Finalmente, el perfil a utilizar será el V-SLOT 2020, en conjunto con los conectores destinados al ensamble de estos (ver figura 4.1). Cabe resaltar que se utilizará corte por sierra para obtener las longitudes deseadas de los perfiles.



Figura 4.1: Perfil V-SLOT 2020 (izquierda), conector de tres vías (centro) y *bracket* de esquina a 90° (derecha) (Fuente: www.naylampmechatronics.com).

4.1.2 Dimensionamiento de la estructura

Como se mencionó con anterioridad, la estructura de soporte estará compuesta por perfiles estructurales de aluminio. Este arreglo de perfiles será del tipo paralelepípedo. Los *enclosures* que contengan las cámaras se situarán en la parte interior, el *enclosure* principal estará fijo en la parte superior de esta y los sujetadores estarán ubicados en los perfiles laterales (ver figura 4.2).

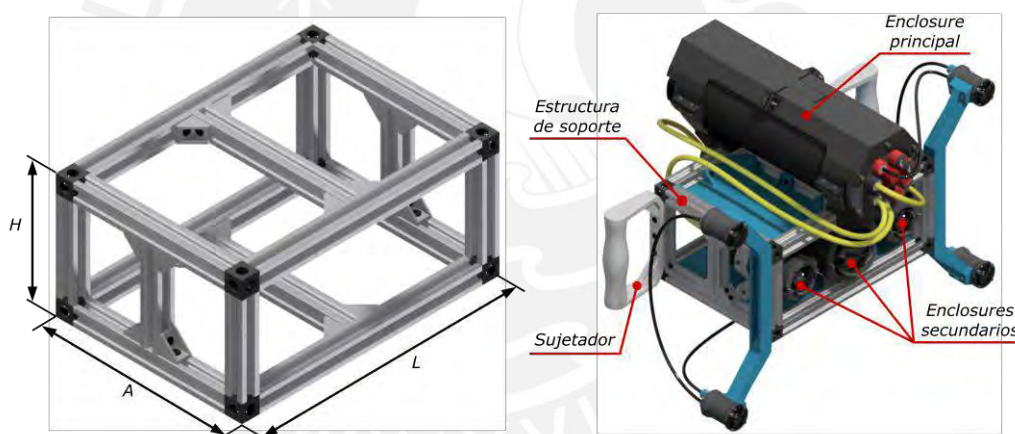


Figura 4.2: Estructura de soporte (derecha) y ubicación de los componentes principales (Fuente: Elaboración propia).

Donde H , A y L son la altura, ancho y largo de la estructura (en mm), respectivamente. En este sentido, con el fin de disminuir el peso del sistema, se propone reducir la longitud al mínimo de los perfiles que conforman los lados verticales de la estructura. Debido a la restricción en la longitud mínima de corte de estos elementos, esta longitud no puede ser menor a 100 mm, es decir, el valor su altura será $H = 140 \text{ mm}$. Esto no supone alguna complicación ya que los diámetros de los *enclosures* que protegerán a las cámaras serán de 58 mm (cámaras secundarias laterales) y 87 mm (cámara principal central) con longitudes de 118 y 246 mm, respectivamente. Cabe

recalcar que el *enclosure* principal tiene un diámetro de 112 mm con una longitud efectiva de 330 mm, la elección de estos *enclosures* será desarrollada en incisos posteriores.

Se propone posicionar el *enclosure* principal en la parte central superior de la estructura y que su cara trasera sea coplanar a la cara trasera del *enclosure* de la cámara central. Estas restricciones permiten calcular la longitud de los perfiles situados en el ancho de la estructura (ver figura 4.3).

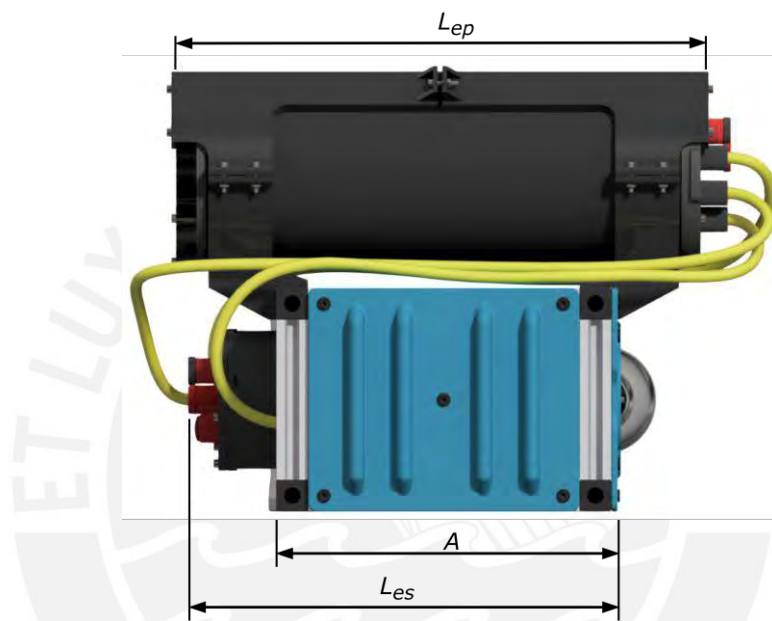


Figura 4.3: Longitudes principales en la estructura principal
(Fuente: Elaboración propia).

Para que la estructura cubra por completo los *enclosures* secundarios laterales, el ancho de esta no puede ser menor a la longitud de estos elementos. A partir de ello, se obtiene las siguientes restricciones para el cálculo de la longitud del perfil:

$$(2L_{es} - L_{ep} < A) \wedge (L_{se} < A).$$

Donde:

- L_{se} : Longitud efectiva del *enclosure* secundario lateral, en mm.
- L_{ep} : Longitud efectiva del *enclosure* principal, en mm.
- L_{es} : Longitud efectiva del *enclosure* secundario central, en mm.

Así, la longitud del perfil que conforma la arista de la estructura de soporte será de 170 mm y por ende $A = 210 \text{ mm}$. Por otra parte, la cavidad interior de la estructura debe permitir el ingreso de una mano para la activación del *switch* en los *enclosures*

secundarios. Por ello, la longitud de los perfiles de las aristas en el ancho de la estructura es 250 mm, considerando que el diámetro máximo de la mano de una persona es de 80 mm, es decir, $L = 290 \text{ mm}$ (ver cálculo detallado en Anexo B.1).

Para que la estructura de soporte posea mayor rigidez y resistencia, se añaden perfiles centrales paralelos a las aristas verticales de las caras laterales y a las aristas horizontales en las caras superior e inferior (ver figura 4.2). En la tabla 4.2 se presentan los perfiles con su longitud requerida y los componentes de conexión necesarios.

Tabla 4.2: Elementos de la estructura de soporte (Fuente: Elaboración propia).

Elemento	Dimensión (mm)	Cantidad
V-SLOT 2020	250	4
	170	6
	100	6
Conector de tres vías	$20 \times 20 \times 20$	8
Bracket de esquina a 90°	$20 \times 20 \times 17$	16
Tornillo de bajo perfil	M5 \times 14	24
	M5 \times 8	32
Tuerca en T	M5	32

Finalmente, con el fin de proteger a los tornillos ante la oxidación, se propone realizar tratamientos como el galvanizado el recubrimiento de zinc-níquel y así prolongar su tiempo de vida útil. Así, de ser necesario, los tornillos que presenten indicios de oxidación deben ser cambiados en cada mantenimiento.

4.1.3 Esfuerzos mecánicos en la estructura

Para determinar los esfuerzos mecánicos se analizó el caso crítico al cual estarían sometidos los perfiles de la estructura de soporte. Esto considera únicamente que las cargas están siendo soportadas por los perfiles ubicados en las aristas horizontales superiores del paralelepípedo (ver figura 4.4). Por otra parte, las cargas que actúan sobre ellos son el peso del crítico del sistema (9 kg) y la fuerza de arrastre cuando el sistema está siendo impulsado verticalmente a la velocidad máxima establecida en los requerimientos del sistema (2 m/s). Debido a que los perfiles de la estructura no trabajan como contenedores de pared delgada, se considera que el esfuerzo resultante de la presión del agua es despreciable.

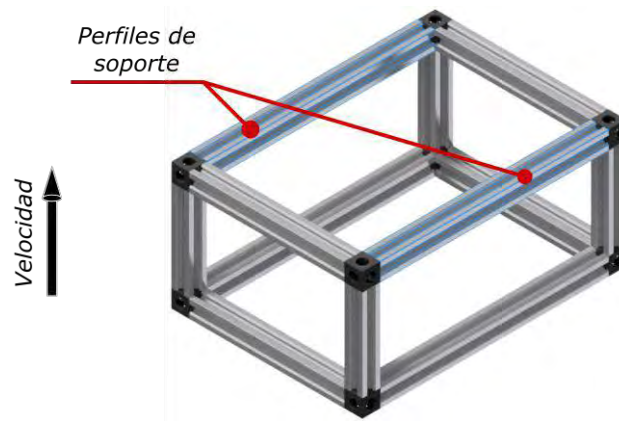


Figura 4.4: Ubicación de los perfiles de soporte de cargas (Fuente: Elaboración propia).

Debido a que los perfiles se encuentran unidos mediante tornillos que pasan a través del agujero roscado central de estos, se considera que el soporte en los dos extremos de estos son del tipo empotramiento. Así, ya que se cuenta con elementos de conexión que permiten el ensamble del *enclosure* principal con la estructura, un porcentaje del peso se encuentra distribuido en la región central de contacto entre estos elementos. Se analizará el caso donde todo el peso crítico del sistema se encuentre en el *enclosure* principal, lo que significa que toda la carga sea transmitida por el área de contacto, y el caso en el que todo el peso del sistema se encuentre en los otros componentes del sistema, es decir que el peso se distribuya homogéneamente en toda el área de los perfiles de soporte.

Otra fuerza a considerar es la ejercida por el arrastre producido por el fluido en entorno de trabajo la cual depende de la geometría del cuerpo, la velocidad de desplazamiento y el comportamiento del fluido. Debido a que la zona de desplazamiento relativo del fluido cuando el sistema se mueve en dirección vertical posee geometría compleja, ya que presenta superficies cilíndricas y planas, se considerará que la geometría efectiva es un plano cuadrado.

En base al coeficiente de arrastre de una sección plana para el número de Reynolds obtenido, las propiedades del agua de mar, la longitud de los perfiles y el peso crítico (Aziz et al., 2008), se obtuvieron los siguientes resultados (ver Anexo B.2 y Anexo B.3):

$$Re = 27,88 \cdot 10^4, C_D = 1.90, F_D = 237.69 \text{ N}, f = 0.95 \frac{\text{N}}{\text{mm}}, g = 1.47 \frac{\text{N}}{\text{mm}}.$$

En el primer caso, se obtuvo un esfuerzo máximo de $\sigma_{eq} = 5.54 \text{ MPa}$, el cual es menor al máximo permitido $\sigma_{m\acute{a}x} = 87.5 \text{ Ma}$.

En este sentido, se observa que el esfuerzo resultante es significativamente menor al máximo permitido, por lo que la adición del esfuerzo producto de la presión no afectará en el desempeño mecánico de la estructura.

No obstante, debido a que la estructura presenta una geometría compleja, lo que dificulta estimar la distribución de cargas idónea e impide el análisis teórico de los concentradores de esfuerzos, es necesario simular las cargas en la estructura de soporte. En la figura 4.5 se presenta la distribución de cargas obtenidas del análisis preliminar. Cabe aclarar que la carga crítica que concierne el peso del *enclosure* principal se ha reducido a una carga puntual lo que generará mayores esfuerzos.



Figura 4.5: Distribución de cargas en el arreglo de perfiles (Fuente: Elaboración propia).

En la figura 4.6 se muestran los esfuerzos normales máximos en la configuración de perfiles. Estos esfuerzos límites son menores al máximo recomendado (127.5 MPa) por lo que se puede concluir que el arreglo de perfiles no falla.

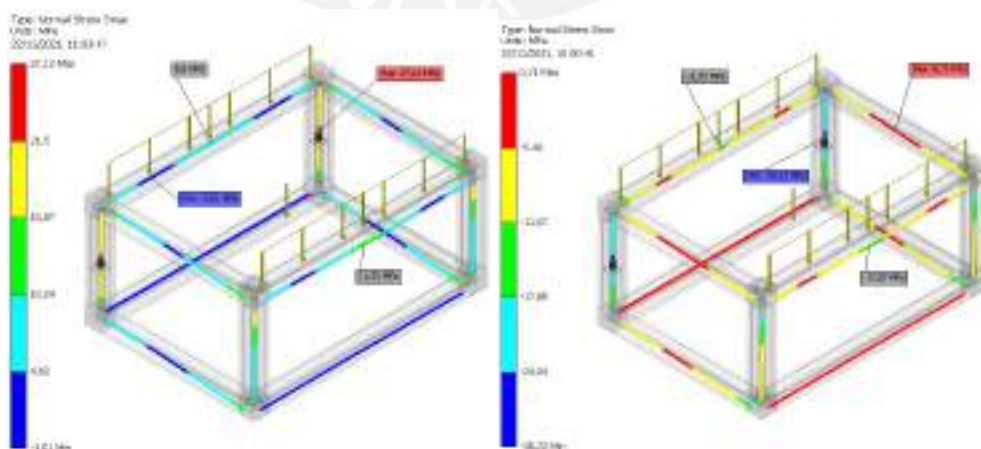


Figura 4.6: Esfuerzos normales máximo (izquierda) y mínimo (derecha) en la estructura (Fuente: Elaboración propia).

Por otra parte, en la figura 4.7 se muestra el desplazamiento de los elementos de la estructura de soporte, en donde se puede concluir que el error máximo generado por la deformación de la estructura en el sentido de la orientación del ángulo de cabeceo (*pitch*) es $e_{\theta} = \arctan\left(\frac{0.40-0.08}{190}\right) = 0.1^{\circ}$.

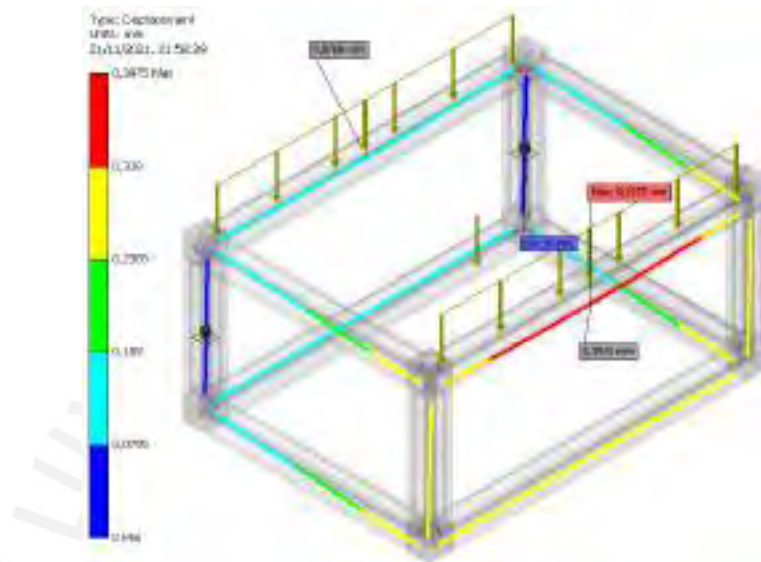


Figura 4.7: Desplazamiento de la estructura ante cargas críticas (Fuente: Elaboración propia).

4.2 Diseño de los *enclosures* de albergue de componentes

En este inciso se desarrollará el análisis y diseño de los *enclosures* que componen el sistema. Se presentará la estimación de las dimensiones de estos contenedores y los sellos correspondientes. Adicionalmente, se analizarán los productos comerciales que cumplen con los criterios de diseño establecido.

4.2.1 Estimación de las dimensiones de los *enclosures*

Con el fin de reducir el peso del sistema, se utilizarán *enclosures* con las dimensiones mínimas que permitan la inclusión de todos los componentes. Así, los componentes que estarán en contacto con el exterior y permiten que los *enclosures* del sistema estén interconectados son elementos roscados denominados *penetrators* (ver figura 4.8). Los *penetrators* poseen un agujero pasante central que permite el paso de cables que se adhieren a este primero por medio de resina *epoxy* para aplicaciones submarinas. Además, se le agrega una ranura en la zona de contacto con el sello lateral en la cual se incluirá un O-Ring que, al ser comprimido en la instalación, evita el paso del fluido.

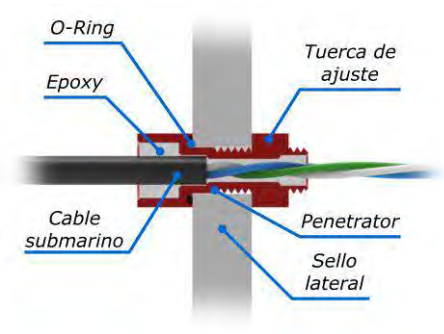


Figura 4.8: *Penetrator* para conexión con *enclosure*

(Fuente: www.bluerobotics.com).

Primero, como se menciona en el apartado de selección de componentes (ver capítulo 5, inciso 5.1), el elemento de mayor dimensión es el computador Jetson Nano ($100 \times 80 \times 28$ mm). Por ello, el diámetro del *enclosure* principal, encargado de la protección de este y otros elementos electrónicos y de control, debe mayor o igual a 100 mm. Por otra parte, la longitud necesaria del *enclosure* principal debe tener espacio suficiente para albergar la batería, los separadores, conectores USB, y los *penetrators* (ver figura 4.9).

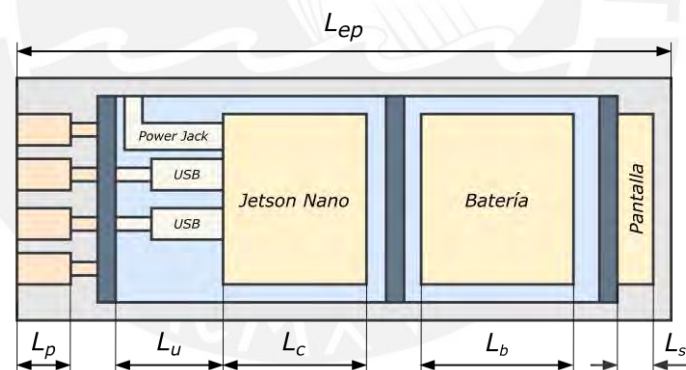


Figura 4.9: Dimensiones de componentes en *enclosure* principal

(Fuente: Elaboración propia).

Donde:

- L_p : Longitud máxima entrante de los *penetrators*, en mm.
- L_u : Longitud de los conectores USB y alimentación por Power Jack, en mm.
- L_b : Longitud de la batería, en mm.
- L_s : Ancho de la pantalla, en mm.

No se considera el espacio ocupado de los otros componentes debido a que estos se encontrarán en la otra cara de la bandeja de sujeción (ver inciso 4.4.3). Así, la expresión que permite obtener la longitud ideal de *enclosure* principal es la siguiente:

$$L_p + L_u + L_c + L_b + L_s + FS \leq L_{ep}.$$

Considerando que la longitud de ingreso del *penetrator* conformado por el *switch* submarino es de 30.6 mm, utilizando las dimensiones especificadas en la selección de componentes (ver capítulo 5, inciso 5.1) y un factor de seguridad $FS = 50 \text{ mm}$ obtenemos:

$$285.6 \text{ mm} \leq L_{ep}.$$

En este sentido, sabiendo que el diámetro del *enclosure* es mínimo y aplicando el análisis de esfuerzos para contenedores de pared delgada, se obtiene que el espesor mínimo de este debe ser de 2.17 mm para Aluminio 6061-T6 (ver Anexo B.4). Por ello, se selecciona el *enclosure* de 4 pulg (111.6 mm de diámetro exterior) con 298 mm de longitud del distribuidor BlueRobotics debido a que este cumple con todos los requerimientos descritos anteriormente (ver figura 4.10).



Figura 4.10: *Enclosure* principal de 4 pulg (izquierda) y *enclosure* de 2 pulg para cámaras laterales

(Fuente: www.bluerobotics.com).

Asu vez, este distribuidor cuenta con *enclosures* de 2 pulg (58 mm de diámetro exterior) con 100 mm de longitud de diámetro (ver figura 4.14) capaces de trabajar a profundidades de 950 m, ideal para contener las cámaras secundarias laterales, al cual se le puede añadir un sello lateral de tipo domo y tipo plano con cuatro agujeros pasantes para los *penetrators* necesarios: *switch*, indicador, *penetrator* para cable y válvula de liberación de presión. Este último permite que la presión generada al cerrar el *enclosure* escape y se cierre correctamente (este es requerido para todos los

enclosures involucrados). No obstante, para mejorar la adquisición de imágenes se recomienda utilizar puertos tipo domo con el mayor radio posible, con el fin de aumentar la distancia mínima de enfoque (F. Menna et al., 2017). Por ello, se utilizará un *enclosure* de 3 pulg (86.49 mm de diámetro exterior) con longitud de 222 mm y espesor mínimo de 1.91 mm, el cual es mayor el espesor mínimo requerido. Además, el uso de un *enclosure* de mayor tamaño permitirá incluir cámaras con mayor rendimiento y dimensiones en trabajos futuros.

4.2.2 Análisis del desempeño de los *enclosures* comerciales

Debido a que el distribuidor de los *enclosures* de 4 pulg y 3 pulg no asegura su seguridad para una operación de 750 m de profundidad, se realizará una simulación por elementos finitos para comprobar satisfactoriamente la resistencia de los componentes seleccionados. Las cargas generadas son producto de la presión de una columna de agua de mar a la profundidad especificada. En la figura 4.11 se muestra los resultados de la simulación con una presión radial de 7.6 MPa y una fuerza axial distribuida de $F = 7.6 \cdot \pi \cdot 111.6^2/4 = 74350 \text{ N}$ para el *enclosure* de 4 pulg.

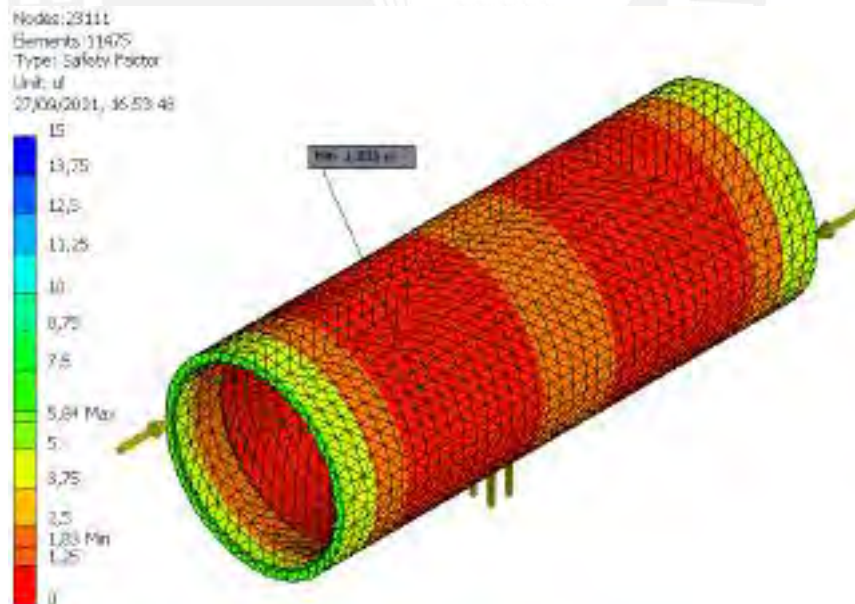


Figura 4.11: Factor de seguridad del *enclosure* de 4 pulg según simulación por elementos finitos (Fuente: Elaboración propia).

El análisis muestra satisfactoriamente que el elemento no falla pues tiene como factor de seguridad mínimo de 1.83, el cual se encuentra en la zona de menor espesor lo cual concuerda con el resultado obtenido a partir del análisis teórico de esfuerzos.

Por otra parte, en la figura 4.12 se puede apreciar la simulación del *enclosure* de 3 pulg a una presión radial de 7.6 MPa y una carga axial de $F = 7.6 \cdot \pi \cdot 86.49^2 / 4 = 44655 \text{ N}$.

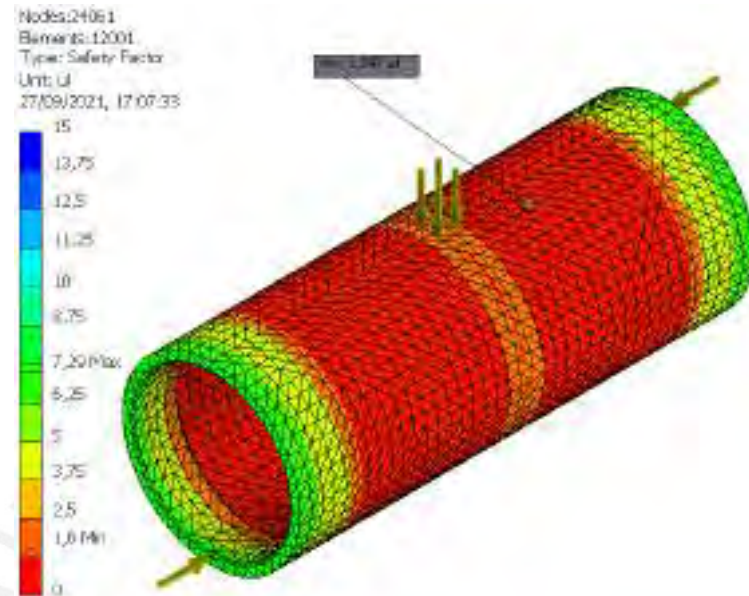


Figura 4.12: Factor de seguridad del *enclosure* de 3 pulg según simulación por elementos finitos (Fuente: Elaboración propia).

Se puede ver que el factor de seguridad mínimo es 1.60 lo cual asegura que el elemento no falla y, análogamente al caso anterior, el punto con máxima sollicitación se encuentra en el espesor mínimo. Finalmente, se comprueba que es posible utilizar estos componentes comerciales a una profundidad de 750 m y reducir los costos asociados a la fabricación de contenedores adicionales.

4.2.3 Diseño de los sellos laterales

Cada sello lateral puede estar compuesto por uno o dos componentes individuales. La segunda configuración se conforma por una capa final (*end cap*, por su denominación en inglés), la cual es encargada de sostener los *penetrators* y demás componentes en contacto con el exterior, y una brida (*flange*, por su denominación en inglés) que se une a la cara interior del *enclosure* y normalmente tiene tres O-Rings (dos en contacto con el *enclosure* y uno en contacto con el capa final), esta última se une con el sello final por medio de uniones atornilladas (ver figura 4.13) (Moore et al., 2010).

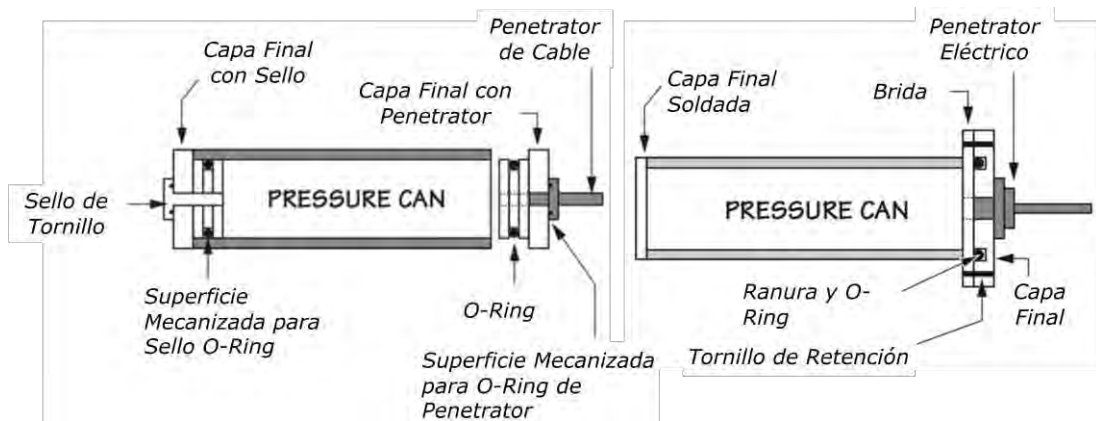


Figura 4.13: Sello lateral de una pieza (izquierda) y de dos piezas (derecha) (Fuente: Moore et al.).

Se considerarán dos conjuntos de sellos laterales que serán utilizados de acuerdo al modo de uso. Para su uso por buzo con una profundidad de sumersión estándar de 60 m, el *enclosure* principal debe contar con un sello transparente para permitir la visualización de la pantalla y otro que permita la inclusión de un mínimo de ocho *penetrators*. Por otra parte, el *enclosure* secundario central de 3 pulg necesita un sello de tipo domo para la cámara, y otro con cuatro agujeros para la válvula y componentes de interfaz. Análogamente, se requerirán sellos de 2 pulg con 4 agujeros para los *enclosures* secundarios laterales.

Estos componentes serán seleccionados del mismo distribuidor de los *enclosures*, donde se dispone para el *enclosure* de 4 pulg de un sello con capa final de diez agujeros para la inclusión de *penetrators*. En la figura 4.14, se muestran los tipos de *penetrators* y su distribución para los dos modos de uso.

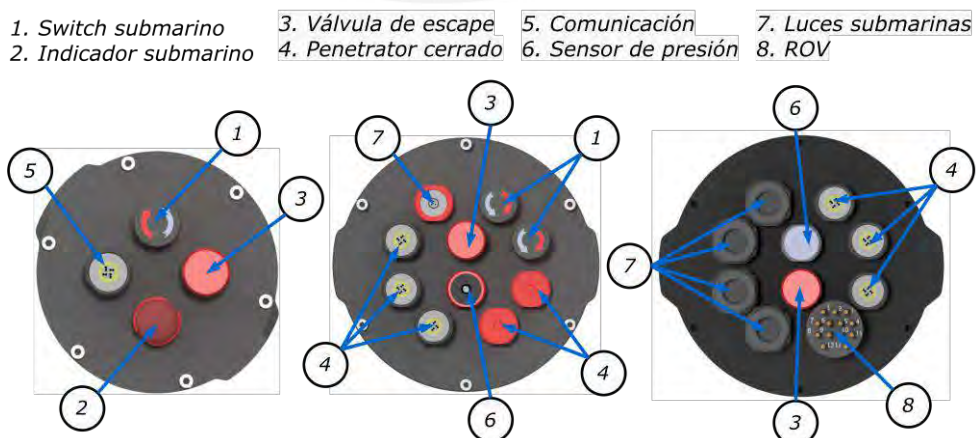


Figura 4.14: *Penetrators* en los *enclosures* secundarios (izquierda), 4 pulg para el modo buzo (centro) y modo ROV (derecha) (Fuente: Elaboración propia).

Cabe aclarar que los sellos laterales para su uso por ROV serán diseñados ya que los componentes de sellado de los *enclosures* que provee BlueRobotics pueden trabajar hasta 300 m de profundidad.

Para que los sellos laterales diseñados posean mayor rigidez y resistencia, estos se conformarán por un único elemento. Así, de acuerdo a la teoría de elasticidad aplicada al análisis de platillos, es posible determinar el esfuerzo máximo que soportan platillos circulares bajo la aplicación de una carga uniforme (Timoshenko, 1974). Se considera que una región de la capa final estará en contacto con la brida y el diámetro efectivo para el cálculo de resistencia es el diámetro interior de esta última (ver figura 4.15).

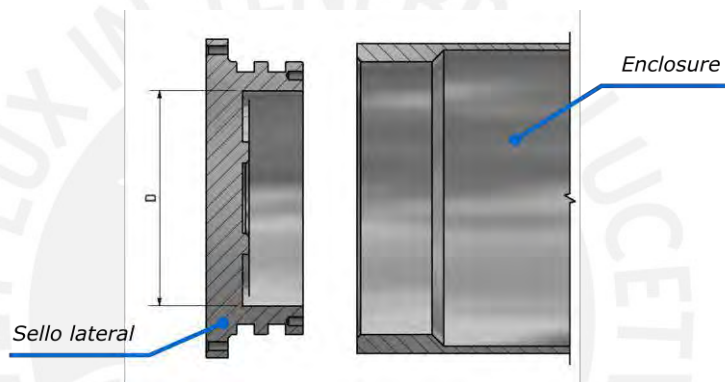


Figura 4.15: Diámetro efectivo (D) de aplicación de presión en los sellos laterales (Fuente: Elaboración propia).

Los resultados obtenidos muestran que es necesario un espesor mínimo de 14 mm para el *enclosure* de 4 pulg (*enclosure* principal), y 10 mm para el *enclosure* de 3 pulg (*enclosure* de cámara principal), los cálculos detallados se muestran en el Anexo B.5. Estos sellos se muestran en la figura 4.16.

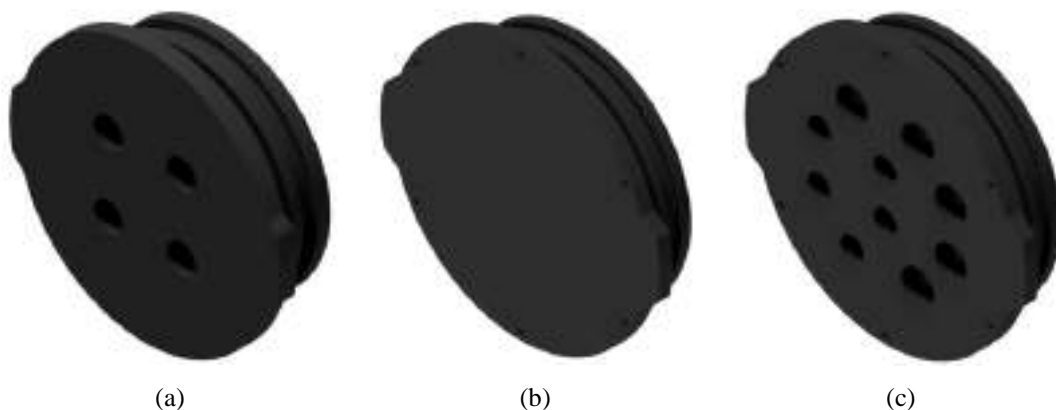


Figura 4.16: Sello lateral para *penetrators* de 3 pulg (a), sello lateral cerrado de 4 pulg (b), sello lateral para *penetrators* de 4 pulg (c) (Fuente: Elaboración propia).

Estas tapas tienen incluidas salientes para facilitar la extracción de los sellos laterales. Asu vez, debido a su espesor considerable, que podría impedir que las tuercas de los *penetrators* sujeten a estos últimos correctamente, se ha incluido una parte roscada al interior de agujeros con el fin de proveer un agarre adicional al sello lateral (ver detalle en Anexo F, planos mecánicos). En este sentido, se propone su fabricación por medio de una máquina de control numérico computarizado (CNC, por sus siglas en inglés) ya se requiere de una precisión elevada (en el orden de 0.025 mm) para su fabricación (Moore et al., 2010).

En la figura 4.17 se muestran los resultados de las simulaciones por elementos finitos del sello lateral cerrado del *enclosure* de 4 pulg, donde se puede observar que el factor de seguridad en el centro del sello es de 3.49. Además, el factor de seguridad mínimo es de 1.27; esto debido a que se existe un concentrador de esfuerzos en el cambio de sección del elemento. No obstante, durante la deformación, esta zona entrará en contacto con el *enclosure* lo que disminuirá los esfuerzos presentes en este componente y aumentará su factor de seguridad.

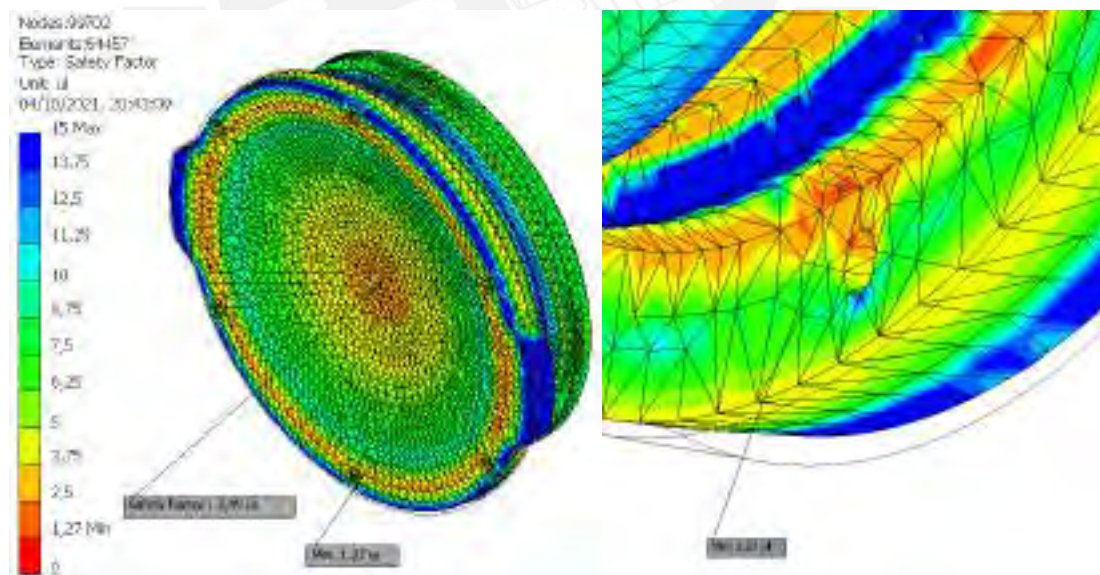


Figura 4.17: Factores de seguridad en el sello lateral de 4 pulg cerrado (izquierda) y localización del factor de seguridad mínimo (derecha) (Fuente: Elaboración propia).

Así, en la figura 4.18 se muestra la simulación de los sellos laterales con agujeros para los *enclosures* de 3 pulg y 4 pulg.

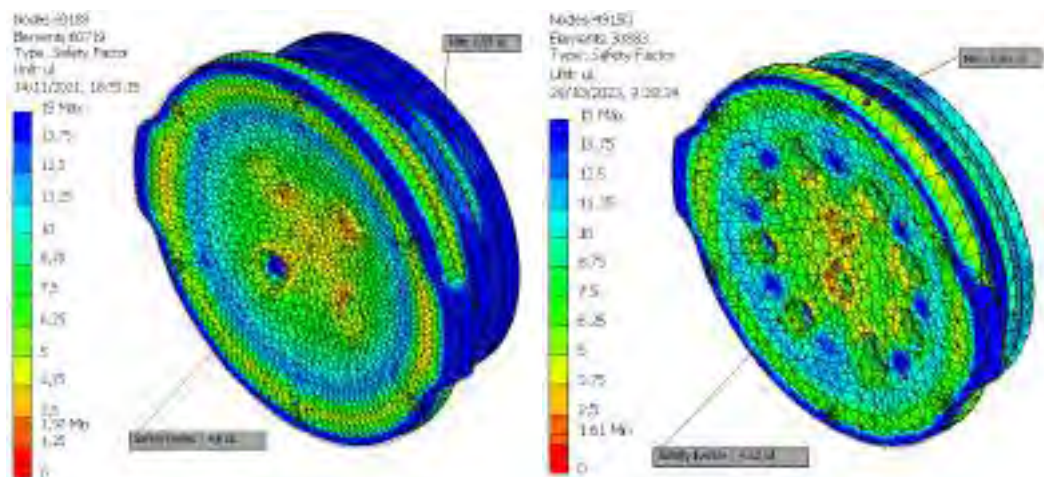


Figura 4.18: Factores de seguridad en el sello lateral con agujeros de 3 pulg (izquierda) y de 4 pulg (derecha) (Fuente: Elaboración propia).

Los factores de seguridad mínimos son 1.97 y 1.61 en los sellos de 3 pulg y 4 pulg, respectivamente. Se puede observar que los factores de seguridad mínimos se encuentran en la misma zona que el punto crítico en el sello cerrado de 4 pulg. A partir de ello, se puede concluir que los elementos no fallan debido a la presión estática en las condiciones de trabajo.

Finalmente, los *O-Rings* seleccionados son de tamaños 232 (para los sellos de 3 pulg) y 239 (para los sellos de 4 pulg), de acuerdo a la norma AS568 (ver Anexo B.6), estos deben ser de caucho de nitrilo butadieno (NBR, por sus siglas en inglés) con una dureza de 70 Shore A, recomendado para presiones inferiores a 100 bar (~100 MPa) (Bott, 2014). En este sentido, se colocarán dos en cada sello lateral con el fin de poseer dos puntos de apoyo en el contacto entre los elementos y asegurar que el eje central de estos elementos esté centrado con los *enclosures*.

4.3 Diseño de los componentes de sujeción externos

En este apartado se describirán los elementos que sujetan los *enclosures* principal y secundarios, y las luces submarinas. De acuerdo a las dimensiones propuestas, se estimará la superposición de imágenes entre cámaras en función de la distancia y el rango efectivo de sensado en función de la iluminación y la distancia de enfoque de las cámaras.

4.3.1 Diseño de la cubierta delantera

Para ubicar los *enclosures* secundados a lo largo de la estructura principal se tiene un espacio disponible de 250 mm, se selecciona una distancia base máxima entre los *enclosure* de 90 mm con el fin de proveer espacio para separar los *enclosures* de 2 pulg con los perfiles verticales de la estructura principal. Así, la cubierta delantera será la encargada de sostener a los *enclosures* secundarios por medio de dos uniones atornilladas a los sellos laterales que contienen los puertos tipo domo (ver figura 4.19). Este elementos será fabricado por métodos de manufactura aditiva debido a su complejidad geométrica.

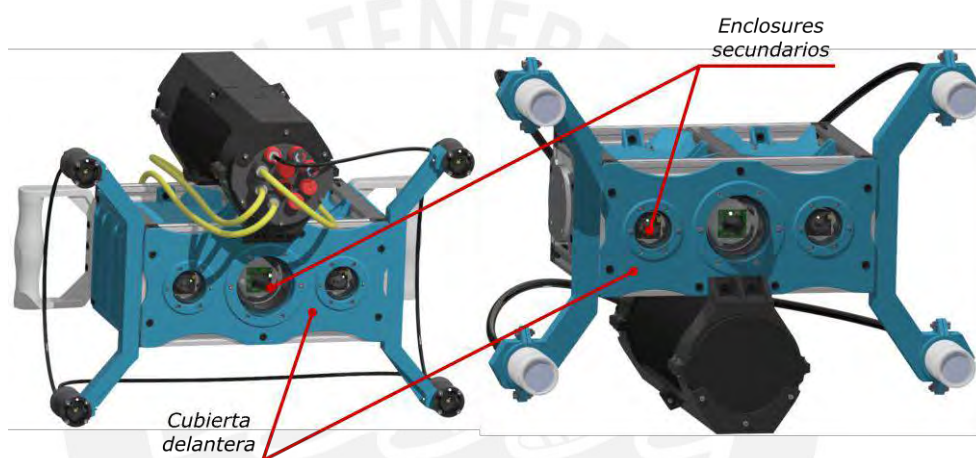


Figura 4.19: Cubierta delantera de soporte de *enclosures* secundarios en la configuración de buzo (izquierda) y ROV (derecha) (Fuente: Elaboración propia).

Realizando el análisis de las fuerzas generadas debido al movimiento del sistema a través del fluido se obtiene una fuerza de arrastre de 158.46 N (ver Anexo B.7), la cual actúa sobre toda el área delantera. Por otra parte, se asumirá que todo el peso de los *enclosures* secundarios está siendo soportado por el componente para con el fin de analizar el caso crítico de operación. De esta forma, la simulación por elementos finitos del componente se muestra en la figura 4.20 y se realizó con ácido poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés), material utilizado en el prototipo presentado en el capítulo 7.

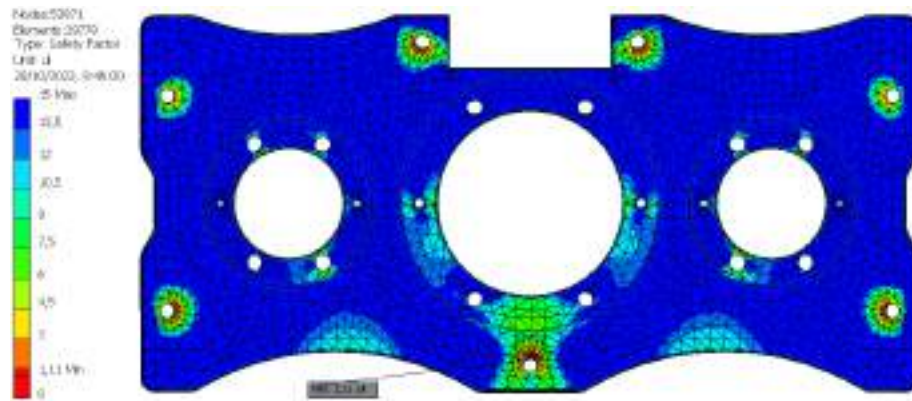


Figura 4.20: Factor de seguridad de la cubierta delantera
(Fuente: Elaboración propia).

Se observa que el factor de seguridad mínimo (1.11) se encuentra en un agujero de conexión con la estructura principal mediante.

4.3.2 Diseño de los sujetadores de luces y análisis del rango de operación

Debido a que las cámaras están dirigidas hacia una dirección específica con una distancia base establecida, la superposición de las imágenes adquiridas por las cámaras dependerá de los ángulos de apertura de estas y la distancia entre el sistema y el área de sensado. En la figura 4.21 se muestra el área de sensado de las cámaras y la superposición de las imágenes.

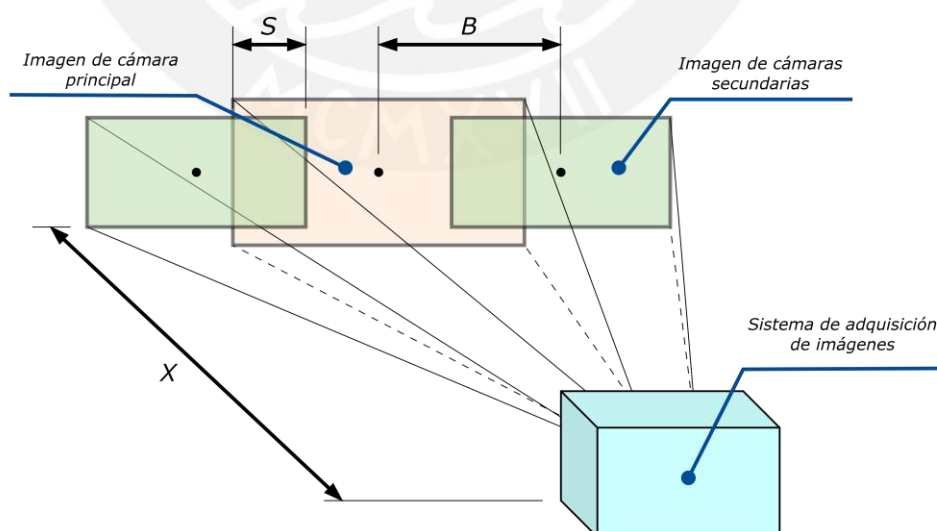


Figura 4.21: Área de sensado del sistema y parámetros de interés (Fuente: Elaboración propia).

Donde:

- X : Distancia entre el sistema y ambiente submarino, en m.
- S : Superposición de imágenes, en %.
- B : Distancia base entre cámaras, en m.

Realizando el análisis respectivo (ver Anexo B.8) y considerando que la superposición es el porcentaje de píxeles comunes entre las imágenes de la cámara central y lateral, se obtuvo que la superposición de imágenes mínima de 52.99 % con $B = 0.09 \text{ m}$. Esta superposición ocurre a una distancia $X = 0.14 \text{ m}$, la cual es la distancia mínima de enfoque del sistema (cuatro veces el radio del domo con mayor radio) de acuerdo a las consideraciones tomadas en incisos anteriores. En este sentido, la distancia máxima a la cual la superposición mínima entre imágenes sea $S = 98\%$, indicando que el sistema ya no es capaz de obtener información única de cada cámara, es de $X = 6.72 \text{ m}$.

Así, se cuenta con una distribución rectangular de luces con una distancia horizontal de $W = 380 \text{ mm}$ y distancia vertical de $T = 200 \text{ mm}$ (ver figura 4.22). Estas dimensiones permiten que el rango de operación sea menor a 0.3 m y las luces se posicionen en los laterales de la estructura de soporte.

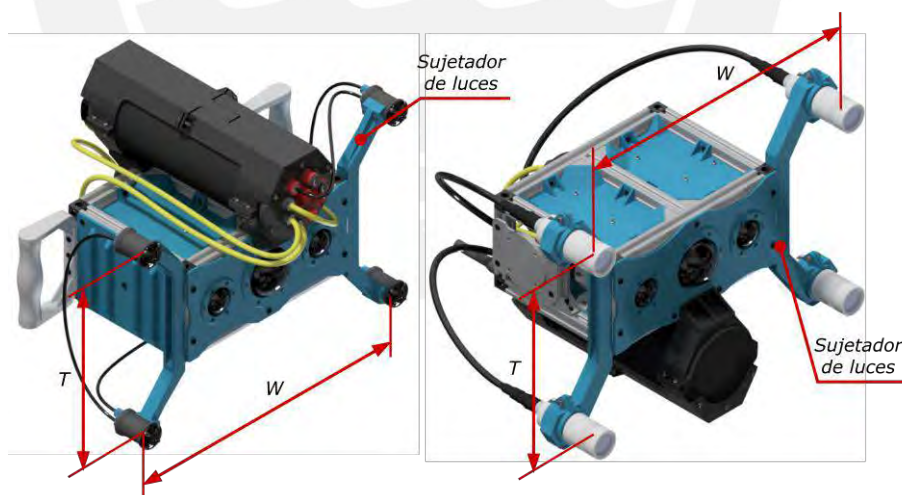


Figura 4.22: Distribución de luces submarinas para uso por buzo (derecha) y para uso por ROV (izquierda) (Fuente: Elaboración propia).

Para determinar el rango de operación de acuerdo a la distribución de luces, se debe considerar que el área de iluminación abarque por completo el área de sensado, y la cantidad de luz por unidad de área (expresada en lux) sea la mínima para la activación

de las cámaras (0.4 lux). De acuerdo con el análisis realizado (ver Anexo B.9) se obtuvieron los rangos de operación para su uso por buzo y ROV: $0.11\text{ m} \leq X \leq 14.31\text{ m}$ y $0.22\text{ m} \leq X \leq 37.43\text{ m}$, respectivamente. Finalmente, en la tabla 4.3 se muestran los rangos de operación de acuerdo a su modo de uso.

Tabla 4.3: Elementos de la estructura de soporte (Fuente: Elaboración propia).

Modo	Rango recomendado (m)	Rango máximo (m)
Buzo	$0.20 \leq X \leq 6.00$	$0.14 \leq X \leq 6.72$
ROV	$0.25 \leq X \leq 6.00$	$0.22 \leq X \leq 37.43$

4.3.3 Análisis de la resistencia y ajuste de tornillos de conexión

Los elementos adicionales para sujetar los *enclosures* están unidos por medio de uniones atornilladas que a su vez se acoplan con la estructura principal. Así, para minimizar el tamaño de los elementos usados se utilizaron tornillos M3 para la mayoría de conexiones entre elementos de sujeción. Los elementos utilizados para sujetar los *enclosures* principal y secundarios se muestran en la figura 4.23.

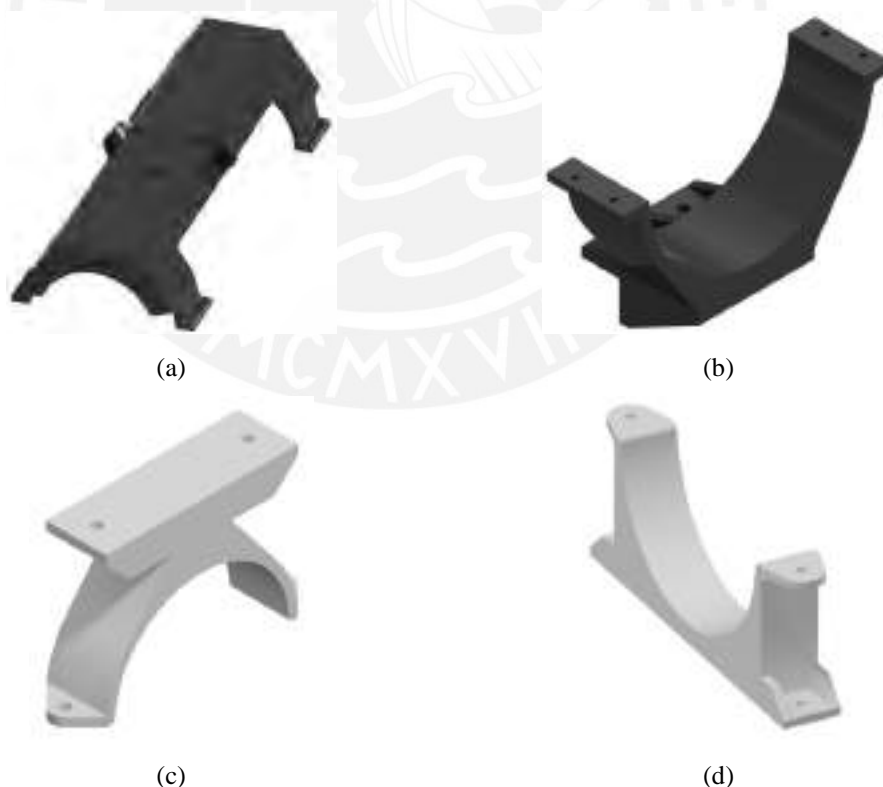


Figura 4.23: Soportes superiores (a) e inferior (b) del *enclosure* principal, soportes del *enclosures* secundarios de 2 pulg (c) y 3 pulg(d) (Fuente: Elaboración propia).

La implementación de estos componentes en la sujeción de sus componentes respectivos se muestra en la figura 4.24.

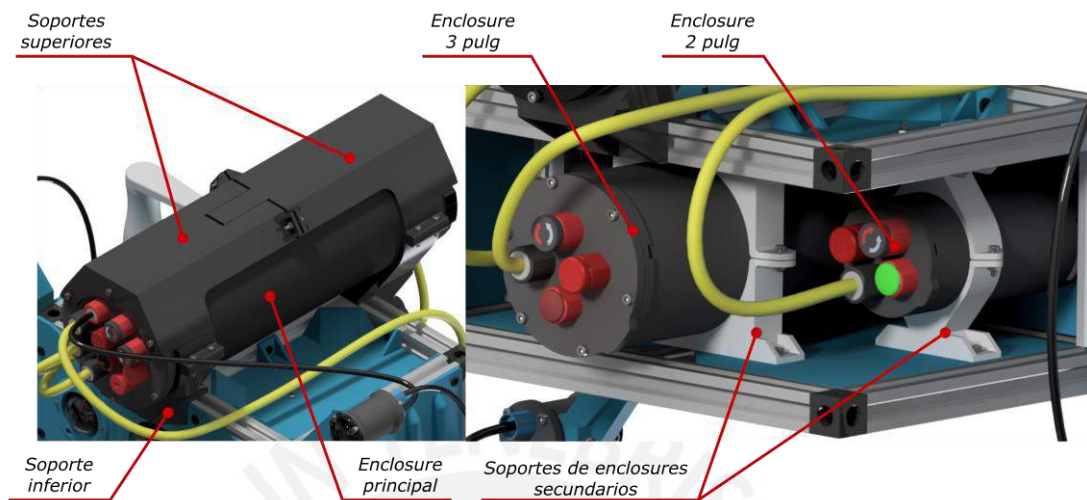


Figura 4.24: Soportes de *enclosure* en el sistema general (Fuente: Elaboración propia).

En este sentido, los tornillos que se encontrarán en máxima sollicitación son los que se ubican en los soportes del *enclosure* de 4 pulgadas, debido a que este es el elemento que posee más peso del sistema. Así, considerando que el peso máximo y la fuerza de arrastre máxima actúan sobre estas uniones, se obtuvo que es necesario un torque de montaje $M = 0.20 \text{ N} \cdot \text{m}$ (ver Anexo B.10). Además, se comprobó la resistencia del tornillo (ver Anexo B.11) durante el montaje en donde se presenta su sollicitación máxima de acuerdo a la norma VDI 2230.

4.4 Diseño de los componentes de sujeción internos

En este inciso se mostrarán los componentes de sujeción de los componentes eléctricos y electrónicos internos del sistema. Estos conforman los sujetadores de las cámaras de los *enclosure* secundarios y la bandeja del *enclosure* principal que es encargada de sostener la batería, controlador, sensores y tarjeta de circuito impreso.

4.4.1 Diseño de la bandeja del *enclosure* principal

Esta bandeja será la encargada de sostener y sujetar los componentes eléctricos, electrónicos y de control alojados en el *enclosure* principal. Esta bandeja está conformada por cinco partes principales: apoyo delantero, soporte principal, apoyo trasero, uniones paralelas y fijador de batería (ver figura 4.25).

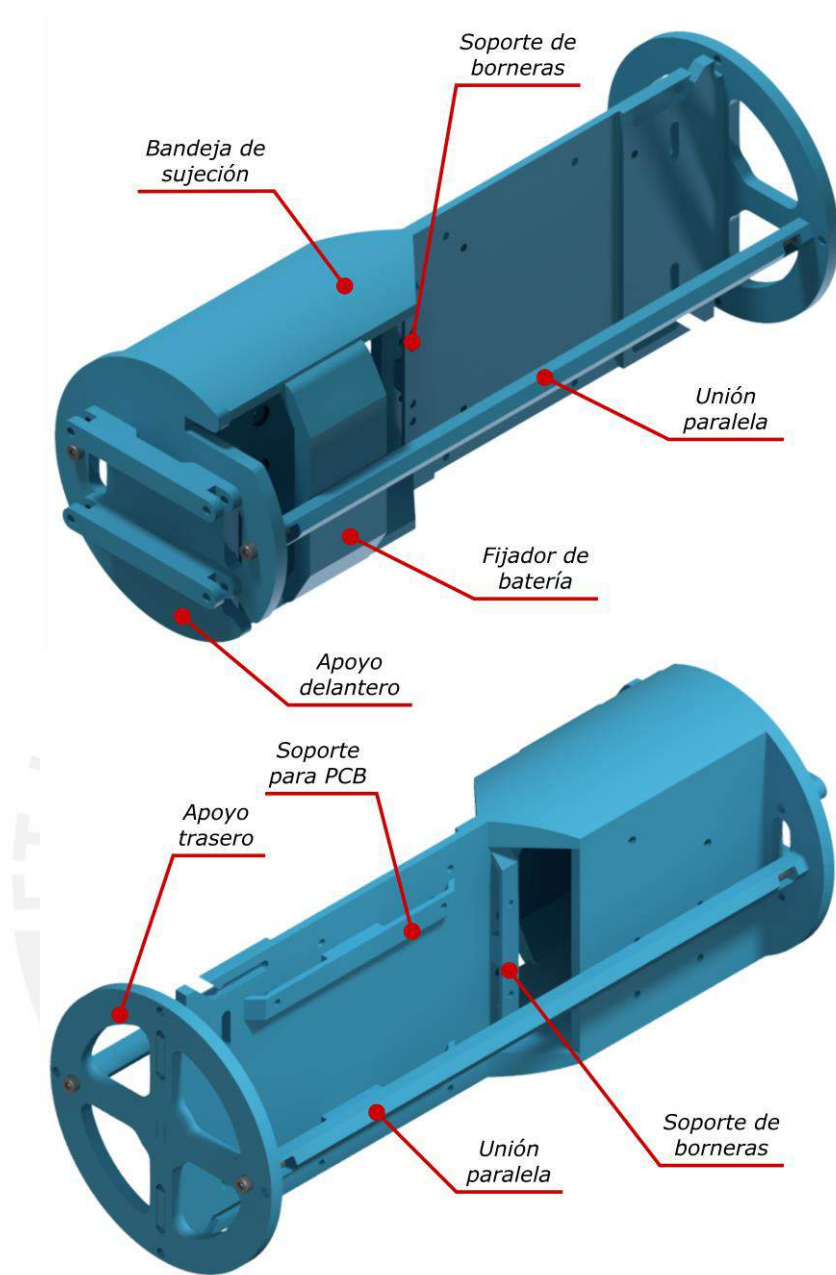


Figura 4.25: Bandeja del *enclosure* principal (Fuente: Elaboración propia).

Esta bandeja se encontrará atornillada por el apoyo trasero al sello lateral que posee agujeros, esto para facilitar la conexión de los puertos USB, indicadores y *switches* submarinos. Por otra parte, el apoyo delantero sujetará la pantalla y estará orientado hacia el puerto transparente de acrílico para permitir la visualización de la información en el modo de uso por buzo. Finalmente, las uniones paralelas tienen como fin principal proveer mayor rigidez a la bandeja principal y conectar los apoyos trasero y delantero de la bandeja de componentes.

4.4.2 Diseño de los soportes de las cámaras

Los soportes de las cámaras se conectarán con los sellos traseros de los *enclosures* secundarios (sellos que contienen los *penetrators*) con la finalidad de facilitar la regulación de los lentes de las cámaras, ya que con este método solamente se requiere desmontar el sello con el puerto domo (ver figura 4.26).



Figura 4.26: Sujetador de cámaras laterales (derecha) y alineamiento de *enclosure* de 2 pulg (izquierda) (Fuente: Elaboración propia).

Con el fin de orientar las cámaras paralelamente a la dirección de enfoque del sistema, es necesario que los dos sellos laterales de los *enclosures* secundarios se encuentren alineados, debido a que el sello delantero (con puerto domo) se conecta con la cubierta delantera por medio de uniones atornilladas. Los *enclosures* de 2 pulg permiten una alineación mecánica entre sus dos sellos como se puede ver en la figura 4.26.

No obstante, el *enclosure* de 3 pulg no cuenta con alineación mecánica propia entre los sellos laterales. Por ello, es necesario incluir un elemento que alinee el sujetador de la cámara principal y el sello lateral delantero y, por ende, se alinee este último con el sello lateral trasero. La solución se muestra en la figura 4.27, donde se propone el uso de un elemento adicional unido al sello delantero para que sirva como guía y alineen los elementos requeridos. El uso de los elementos de alineamiento interno es beneficioso ya que un alineamiento externo podría impedir una simetría adecuada debido a las amplias tolerancias de corte de los perfiles que conforman la estructura de soporte mecánica.



Figura 4.27: Soporte de cámara principal y elementos de alineación entre sellos laterales (Fuente: Elaboración propia).

4.5 Diseño del acople universal entre el sistema y ROV

Este elemento se presenta en la figura 4.28, el cual se acoplará al sistema a través de uniones atornilladas hacia los perfiles de la estructura en ambas caras laterales. Este posee agujeros distribuidos en forma cuadrangular en la parte central que servirán para su acople hacia el ROV submarino. Debido a que las dimensiones del ROV utilizado pueden variar dependiendo de su geometría, es necesario diseñar un elemento apropiado que permita el ensamble del ROV con el acople propuesto.

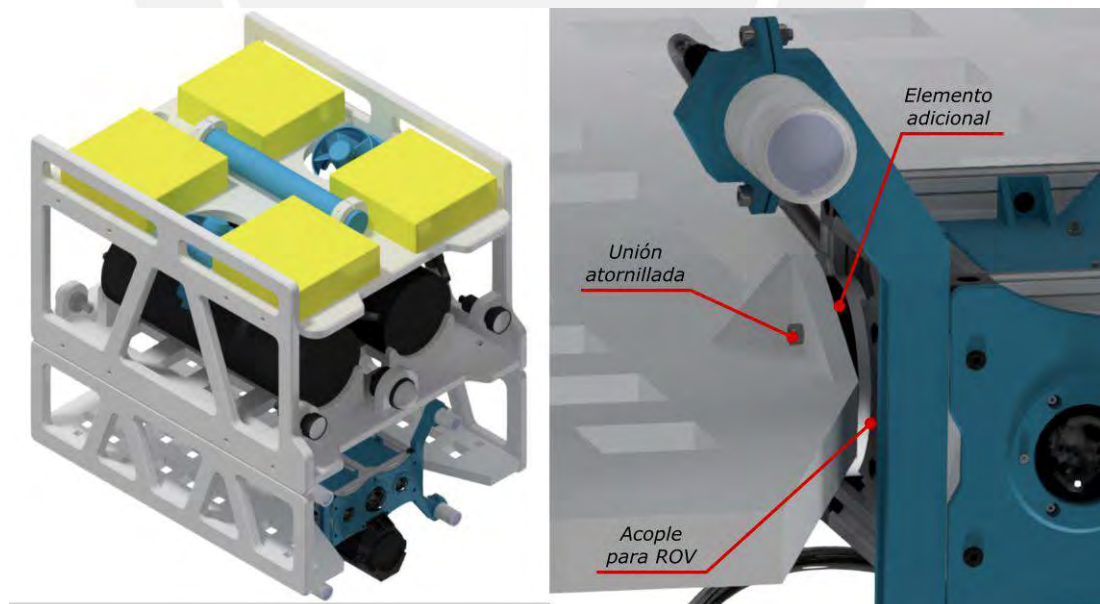


Figura 4.28: Sistema ensamblado a un ROV mediante el acople universal (Fuente: Elaboración propia).

Así, se realizó un análisis de las uniones atornilladas y se obtuvo que es necesario un momento de ajuste de $M = 1.70 \text{ N} \cdot \text{m}$ en los tornillos de conexión con la estructura de soporte (ver Anexo B.12). Por otra parte, se verificó la resistencia de los tornillos de conexión y del acople universal, este último por medio de simulación de elementos finitos donde se obtuvo un esfuerzo máximo $\sigma_{eq} = 16.94 \text{ MPa}$, el cual es inferior al esfuerzo de fluencia de aluminio 6061-T6 (255 MPa) ante las condiciones analizadas en el cálculo del torque de ajuste de los tornillos (ver figura 4.29).

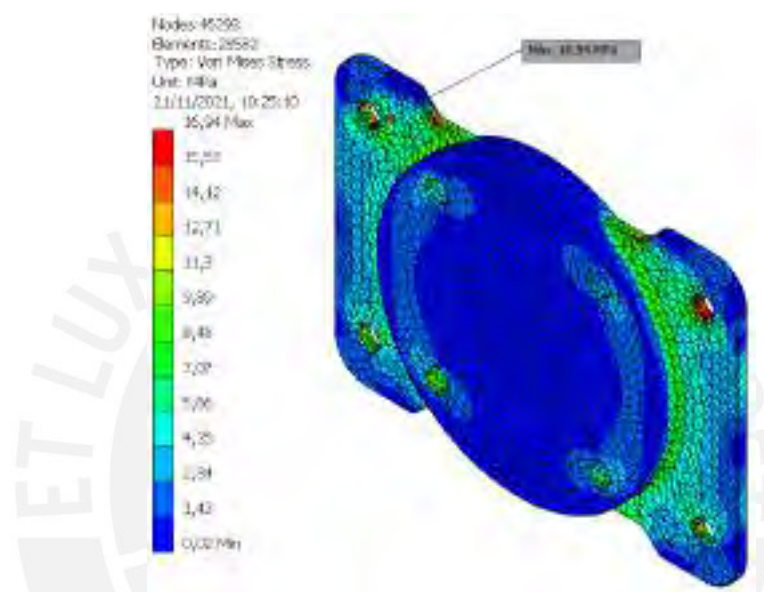


Figura 4.29: Esfuerzos en el acople universal (Fuente: Elaboración propia).

4.6 Listado de planos mecánicos

En la tabla 4.4, se muestran los planos mecánicos del sistema. Estos planos de ensamble y despiece se muestran en el Anexo F. Los planos de despiece y ensamble se han etiquetado como $GX - DYY - AZ$ y $GX - EYY - AZ$, respectivamente; donde X representa al grupo, YY representa al número del plano y Z representa el tamaño de hoja utilizada. El grupo 0 hace referencia a los ensambles generales del sistema integral de cada modo de uso. Los grupos número 1, 2 y 3 son designados a los subensambles de los *enclosures* secundario lateral, secundario central y principal, respectivamente. Los grupos número 4 y 5 conciernen los componentes del ensamble general del prototipo del sistema para una profundidad mínima de 60 m y el ensamble general del sistema para una operación máxima de 750 m, respectivamente. Finalmente, los planos que corresponden a la configuración para modo de uso por buzo, ROV y para ambas se encuentran sombreados de color verde, rojo y azul, respectivamente.

Tabla 4.4: Lista de planos mecánicos (Fuente: Elaboración propia).

Grupo	Tipo	Tamaño	Nombre	Código
0	Ensamble	A0	Ensamble general	G0-E01-A0
	Ensamble	A0	Ensamble general - 750m	G0-E02-A0
1	Ensamble	A2	Enclosure secundario lateral	G1-E01-A2
	Despiece	A4	Soporte de cámara lateral	G1-D01-A4
2	Ensamble	A1	Enclosure secundario lateral	G2-E01-A1
	Despiece	A3	Soporte de cámara central	G2-D01-A3
	Despiece	A4	Seguidor de cámara central	G2-D02-A4
	Ensamble	A1	Enclosure secundario lateral - 750m	G2-E02-A1
	Despiece	A3	Sello lateral de 3" para penetrators	G2-D03-A3
3	Ensamble	A2	Enclosure principal	G3-E01-A2
	Ensamble	A2	Subensamble de bandeja	G3-E02-A2
	Despiece	A4	Soporte delantero de bandeja	G3-D01-A4
	Despiece	A4	Soporte trasero de bandeja	G3-D02-A4
	Despiece	A4	Unión paralela	G3-D03-A4
	Despiece	A4	Sujetador de batería	G3-D04-A4
	Despiece	A3	Bandeja de componentes	G3-D05-A3
	Ensamble	A3	Enclosure principal - 750m	G3-E03-A3
	Ensamble	A2	Subensamble de bandeja - 750m	G3-E04-A2
	Despiece	A3	Sello lateral de 4" cerrado	G3-D06-A3
	Despiece	A3	Sello lateral de 4" para penetrators	G3-D07-A3
4	Ensamble	A3	Estructura de soporte	G4-E01-A3
	Despiece	A3	Sujetador de luces	G4-D01-A3
	Despiece	A4	Sop. enclosure secundario lateral	G4-D02-A4
	Despiece	A4	Sop. enclosure secundario central	G4-D03-A4
	Despiece	A3	Base de soporte derecha	G4-D04-A3
	Despiece	A3	Base de soporte izquierda	G4-D05-A3
	Despiece	A4	Sop. inferior de enclosure principal	G4-D06-A4
	Despiece	A3	Sop. superior delantero de enc. principal	G4-D07-A3
	Despiece	A3	Sop. superior trasero de enc. principal	G4-D08-A3
	Despiece	A3	Sujetador manual	G4-D09-A3
	Despiece	A4	Cubierta delantera	G4-D10-A4
	Despiece	A4	Cubierta lateral	G4-D11-A4
5	Despiece	A4	Sujetador de luces	G5-D01-A4
	Despiece	A4	Complemento sujetador de luces	G5-D02-A4
	Despiece	A3	Sop. superior delantero de enc. principal	G5-D03-A3
	Despiece	A3	Sop. superior trasero de enc. principal	G5-D04-A3
	Despiece	A4	Acople universal	G5-D05-A4

CAPÍTULO 5

DISEÑO ELECTRÓNICO DEL SISTEMA

El presente capítulo desarrollará el diseño electrónico del sistema de adquisición de imágenes submarinas. Se abordará la selección de los componentes por cada subsistema establecido, elementos de control y de alimentación energética. Los datos técnicos de los componentes descritos se muestran en el Anexo D. Posteriormente, se diseñarán los circuitos de protección ante ingreso de agua y para el sensado de voltaje de batería, y se simulará el funcionamiento de cada circuito validando su funcionamiento. A partir de ello, se realizarán los diagramas esquemáticos y el diseño de la tarjeta de circuito impreso. Finalmente, se presentará el cableado y distribución de componentes en el modelo 3D.

5.1 Selección de componentes

En este apartado se presentará la selección de los componentes electrónicos y eléctricos. Esta selección se subdivide en el subsistema de estimación de posición, subsistemas de iluminación y focal, y componentes restantes que conciernen al dominio electrónico. Se recomienda revisar el diagrama general de los componentes electrónicos, presentado en el capítulo 3, inciso 3.4.2.

Por otra parte, debido a que el voltaje lógico de trabajo del computador seleccionado es de 3.3V, se optará por elegir componentes que permitan trabajar al mismo voltaje lógico, esto con fin de evitar el uso de conversores lógicos y reducir el espacio utilizado. La selección de este computador será desarrollada en este inciso posteriormente.

En este sentido, los protocolos de comunicación utilizados por los componentes electrónicos deben estar comprendidos en los manejados por el microcontrolador y el computador, los cuales son: UART, SPI, I²C, CAN, USB y AV (voltaje analógico).

Finalmente, cabe aclarar que se realizarán selección de componentes diferenciando dos versiones del sistema de adquisición de imágenes. Como se mencionó, la primera se basa en una opción *low-cost*, la cual será implementada, con una profundidad de operación estándar de 60 m. Por otra parte, la versión de rendimiento superior involucra la funcionalidad de uso por ROV hasta una profundidad de 750 m.

5.1.1 Selección de sensores para estimación de desplazamiento y orientación

A continuación, se analizarán las diferentes opciones de sensores utilizados en la estimación de posición. Los sensores propuestos se basan en el uso de un barómetro para determinar la presión de trabajo y, por ende, la profundidad de sumersión, y un IMU que permita aplicar los algoritmos de navegación por estima para la localización del sistema.

- **Sensor de presión (barómetro)**

Este sensor debe ser capaz de trabajar en un rango de presiones de 0 – 86 bar o 0 – 8.6 MPa como mínimo. Esto debido a que se adiciona la presión atmosférica a la presión producto del agua a 750 m bajo el nivel del mar. Por otra parte, es necesario que el sensor de presión seleccionado sea de dimensiones reducidas y permita ser incorporado en un *penetrator* con rosca M10 al sello lateral del *enclosure* principal, ver capítulo 4, inciso 4.2.3. En este sentido, el distribuidor KELLER posee una línea de transmisores de presión ultra compactos para aplicaciones oceanográficas que cumplen con las características especificadas (ver tabla 5.1).

Tabla 5.1: Barómetros para aplicaciones submarinas encontrados (Fuente: www.keller-druck.com).

Barómetro	Rango (bar)	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Precisión (%FE)	Interfaz
Serie LD (4 – 9)	0 - 3 a 0 - 200	11 - 19	4.2 - 5	±0.15	I ² C
Serie LC (4 – 9)	0 - 3 a 0 - 200	11 - 19	4.2 - 5	±0.25	AV
Serie LHP (6 – 7)	0 - 2000	13 - 15	8	±0.5	AV

Como se mencionó, estos sensores necesitan de una carcasa de alojamiento que cubra los pines de alimentación y transmisión de datos. Así, el distribuidor BlueRobotics ha desarrollado el sensor Bar100 que incluye el sensor 4LD y permite su incorporación a

los sellos laterales de los *enclosures* propuestos. Por ello, se selecciona el sensor Bar100 debido a las ventajas descritas, este se muestra en la figura 5.1.



Figura 5.1: Sensor Bar100 (Fuente: www.bluerobotics.com).

Algunas características adicionales se presentan en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Características del sensor Bar100 (Fuente: www.bluerobotics.com).

Voltaje de trabajo (VDC)	Corriente máxima (mA)	Temperatura (°C)	Agujero de montaje (mm)	Costo (USD)
2.5 - 5.5	1.5	-40 – 110	10.2	259.00

Sin embargo, para la implementación del prototipo se optará por el uso del sensor Bar30 (ver figura 5.2) del mismo distribuidor el cual posee un rango de trabajo de 0 – 30 bar con un costo de 72.00 USD. Este sensor también puede ser montado en un agujero pasante de 10.2 mm de diámetro y es posible trabajar a un voltaje lógico de 3.3V con una corriente máxima de 1.25 mA.



Figura 5.2: Sensor Bar30 (Fuente: www.bluerobotics.com).

- **Unidad de medición inercial**

Una de las características principales a considerar en la selección de este sensor es el ruido que se genera en las mediciones del acelerómetro y giroscopio. Por otra parte, se debe considerar el *offset* inicial de los sensores y las dimensiones generales de los componentes para minimizar el espacio utilizado. Adicionalmente, debido a que el sistema no será sometido a aceleraciones y velocidades angulares elevadas, todas las

opciones presentadas en la tabla 5.3 cumplen con los rangos máximos durante su operación.

Tabla 5.3: Unidades de medición inercial encontradas (Fuente: www.pololu.com, www.invensense.tdk.com, www.adafruit.com).

IMU	Zero-Offset		Densidad de ruido		Costo (USD)
	Accel. (mg)	Giros. (°/s)	Accel. ($\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)	Giros. ($^{\circ}/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$)	
MPU 9250	X, Y: ± 60 Z: ± 80	X, Y, Z: ± 5	300	0.01	10.99
BNO055	X, Y, Z: ± 80	X, Y, Z: ± 1	190	0.014	34.95
MinIMU-9 v5	X, Y, Z: ± 40	X, Y, Z: ± 80	90	0.007	24.95
UM7-LT	—	—	400	0.0005	176.34

Además, los sensores BNO055 y UM7-LT poseen circuitos *on-board* que permiten obtener los datos de orientación absoluta expresada en cuaterniones y ángulos de Euler. Esto posibilita determinar la aceleración lineal del sistema sin las componentes distribuidas del peso facilitando la aplicación de los algoritmos de navegación por estima. Se selecciona el IMU BNO055 debido a su costo reducido y características presentadas, este se puede apreciar en la figura 5.3.

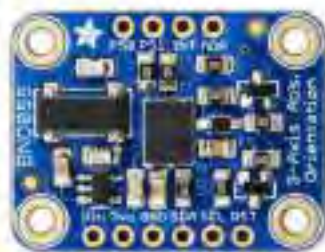


Figura 5.3: Unidad de medición inercial BNO055 (Fuente: www.adafruit.com).

Algunas características adicionales se presentan en la tabla 5.4.

Tabla 5.4: Características del sensor e BNO055 (Fuente: www.adafruit.com).

Dimensiones (mm)	Data rate (Hz)	Voltaje de alimentación (VDC)	Corriente máxima (mA @ 100 Hz)	Interfaz
20 × 27 × 4	100	3.3 – 5.0	12.3	I ² C, UART

5.1.2 Selección de componentes para adquisición de imágenes e iluminación

A continuación, se seleccionarán los componentes electrónicos para los subsistemas focal y de iluminación, los cuales están relacionados. Estos sistemas se basan en el uso de tres cámaras y cuatro luces submarinas.

Debido a que se trabajará en ambientes con baja luminosidad, una característica importante a considerar en la selección de cámaras es la cantidad de luz mínima de activación que les permite adquirir las imágenes. Por ello, todas las cámaras presentadas han sido diseñadas para trabajar en ambientes con poca luz.

- **Cámaras secundarias – laterales**

Como se mencionó, estas cámaras permiten incrementar la información adquirida por el sistema, lo cual mejora la generación de los modelos digitales. En este sentido, no se requiere que estas cámaras sean de alta resolución. Las opciones encontradas se muestran en la tabla 5.5.

Tabla 5.5: Cámaras de resolución media encontradas (Fuente: www.bluerobotics.com, www.arducam.com, www.e-consystems.com).

Cámara	Resolución (MP)	Frame rate (fps)	Dimensiones (mm)	Costo (USD)
Low-light HD USB camera	2.24	30	32 × 32	99.00
Low-light WDR USB camera	2.16	30	38 × 38	49.00
e-CAM22_USB	2.13	60	26 × 65	99.00

Se selecciona la primera opción debido a que presenta una resolución ligeramente superior y sus dimensiones son menores a las otras opciones, lo que permitirá utilizar *enclosures* de menor tamaño, esta cámara se puede apreciar en la figura 5.4.



Figura 5.4: Low-light HD USB camera (Fuente: www.bluerobotics.com).

Algunas características adicionales se presentan en la tabla 5.6.

Tabla 5.6: Características del modelo Low-light HD USB camera (Fuente: www.bluerobotics.com).

Sensibilidad (V/lux · sec)	Iluminación mínima (lux)	Corriente máxima (mA)	Interfaz
5	0.01	220	USB

- **Cámara principal – central**

Esta cámara debe ser de una resolución mayor a las cámaras laterales seleccionadas; por ello, la resolución mínima para esta cámara debe ser de 3 MP. Así, al igual que las cámaras laterales, debe presentar buen rendimiento en ambientes con baja luminosidad. Las cámaras encontradas de alta resolución se muestran en la tabla 5.7.

Tabla 5.7: Cámaras de alta resolución encontradas (Fuente: www.e-consystems.com, www.camera-module.com).

Cámara	Resolución (MP)	Frame rate (fps)	Dimensiones (mm)	Costo (USD)
See3CAM_CU30	3.4	48	30 × 30	75.00
e-CAM82_USB	8	30	30 × 30	129.00
CMT-8MP	8	30	38 × 38	100.00

Se selecciona la cámara e-CAM82_USB debido su resolución de 8MP, dimensiones reducidas y alta confiabilidad; esta cámara se muestra en la figura 5.5.



Figura 5.5: Cámara e-CAM82_USB
(Fuente: www.e-consystems.com).

Algunas características adicionales se presentan en la tabla 5.8.

Tabla 5.8: Características del modelo e-CAM82_USB (Fuente: www.e-consystems.com).

Disparador	Iluminación mínima (lux)	Corriente máxima (mA)	Interfaz
<i>Rolling Shutter</i>	0.4	220	USB

- **Luces submarinas**

Estos elementos que proveen iluminación al entorno de interés, deben ser capaces de operar como mínimo a una profundidad de 750 m (7.6 MPa). Además, estos deben ser alimentados por corriente continua, con el fin de evitar el uso de convertidores. Por otra parte, se priorizarán luces submarinas que presenten bajo peso y que permitan el control por medio de circuitos electrónicos incorporados; las opciones encontradas se muestran en la tabla 5.9.

Tabla 5.9: Luces submarinas encontradas (Fuente: www.outlandtech.com, www.sidus-solutions.com, www.bluerobotics.com).

LED submarino	Intensidad (lm)	Profundidad máxima (m)	Voltaje (VDC)	Costo (USD)
OTI-UWL-401	2500	2000	24	561.33
OTI-UWL-400	5000	1200	24	769.23
DARK SABER	11000	3000	20 – 36	-
Lumen Subsea light	1500	500	7 – 48	115.00

Como se puede apreciar las luces submarinas que permitan una profundidad de trabajo de 750 m poseen un costo elevado. La opción que cumple con todos los requerimientos propuestos y que posee el menor costo es el componente OTI-UWL-401. Este requiere adicionalmente de los conectores submarinos RMG-3-FS proporcionados por la misma empresa por un costo de 30.45 USD y debe conectarse al *enclosure* principal por medio de *penetrators* M14 proporcionados por la empresa BlueRobotics. No obstante, debido a que el prototipo implementado será de bajo costo y solamente requerirá que los elementos permitan su operación con una profundidad estándar de 60 m, se selecciona finalmente el Lumen Subsea light del distribuidor BlueRobotics para su implementación. Por otra parte, la luminosidad relativamente baja de estas luces no afecta en el desempeño del sistema debido a que se trabajará con cámaras *low-light*. Ambos componentes se pueden apreciar en la figura 5.6.



Figura 5.6: UWL-401 (izquierda) y Lumen Subsea light (derecha)

(Fuente: www.outlandtech.com, www.bluerobotics.com).

Algunas características adicionales de ambos modelos se presentan en la tabla 5.10.

Tabla 5.10: Características de los modelos de luces seleccionados

(Fuente: www.outlandtech.com, www.bluerobotics.com).

Componente	Temperatura de color (K)	Ángulo de apertura (°)	Corriente máxima (A)	Señal de control
UWL-401	3000	100	0.84	Analógico/PWM
Lumen Subsea light	6200	135	15/V _{in}	PWM

Cabe resaltar que para la operación del sistema con las luces OTI-UWL-401 se requerirá una fuente adicional de energía la cual debe ser proporcionada por el ROV. Esto debido a que la batería seleccionada no cuenta con la capacidad suficiente la alimentación de estos componentes.

5.1.3 Selección de componentes electrónicos y control

A continuación, se seleccionarán los componentes electrónicos restantes y los elementos que conciernen al control del sistema. Estos comprenden al sensor de ingreso de agua y los elementos de la interfaz: indicadores submarinos, *switches* submarinos y pantalla para visualización. Por otra parte, se justificará el uso de un microcontrolador en conjunto con el computador seleccionado. Finalmente, se indicarán los cables submarinos que será utilizados para transmitir información entre los *enclosures* secundarios y el *enclosure* principal.

- **Sensor de ingreso de agua**

Para determinar si existe ingreso de agua al *enclosure* principal, se propone el uso de un sensor de fuga (*SOS leak sensor*, en inglés) que proporcione un valor digital en alta cuando uno de los extremos de las sondas conectadas a este sensor esté en contacto con el agua. El sensor (ver figura 5.7) es proporcionado por el distribuidor BlueRobotics.



Figura 5.7: Sensor de fuga (Fuente: www.bluerobotics.com).

Las características más importantes de este sensor se muestran en la tabla 5.11.

Tabla 5.11: Características del sensor de fuga (Fuente: www.bluerobotics.com).

Voltaje (VDC)	Corriente máxima (mA)	Sondas disponibles	Dimensiones (mm)	Costo (USD)
3.3 - 5	20	4	13 × 24.5 × 9.5	29

- **Indicadores y *switches* submarinos**

Como parte de la interfaz del operario, es necesario adquirir indicadores luminosos que muestren información del sistema en los siguientes estados: funcionamiento del sistema, activación de adquisición de imágenes y sistema comprometido. Por otra parte, los switches son elementos de accionamiento mecánico destinados a activar procesos durante la operación del sistema; específicamente, están destinados a la activación de estados de operación del sistema. Cabe resaltar que se requiere que estos componentes puedan trabajar a una profundidad mínima de 750 m ya que se utilizarán en ambas configuraciones. Así, estos pueden ser adquiridos del distribuidor BlueRobotics (ver figura 5.8) y permite su inserción en agujeros pasantes de 10.2 mm de diámetro.



Figura 5.8: Indicador submarino (izquierda) y *switch* submarino (derecha)

(Fuente: www.bluerobotics.com).

Las características más importantes de estos elementos se muestran en la tabla 5.12.

Tabla 5.12: Características del indicador y *switch* submarino (Fuente: www.bluerobotics.com).

Componente	Voltaje (VDC)	Corriente máxima (mA)	Profundidad máxima (m)	Costo (USD)
Indicador submarino	3 – 18	30 – 50	950 m	13.00
Switch submarino	26 (máx.)	5000	1000 m	15.00

- **Computador y microcontrolador**

Primero, es necesario realizar un análisis de las variables de entrada y salida al controlador principal para el control de los procesos. Las variables identificadas se muestran en la tabla 5.13.

Tabla 5.13: Variables de entrada y salida del controlador (Fuente: Elaboración propia).

Entrada	Variable	Salida	Variable
1	Activación adquisición de imágenes (discreta)	1	Activación de cámaras (discreta)
2	Activación de luces automáticas (discreta)	2	Intensidad de luces (continua)
3	Activación de luces a máxima intensidad (discreta)		
4	Voltaje de batería (continua)	3	Apagado del sistema (discreta)

El controlador debe poseer la suficiente capacidad para gestionar y procesar imágenes de alta resolución y paralelamente estimar la posición del sistema total. Por ello, es importante que su procesamiento sea veloz y capaz de manejar gran cantidad de información. El computador de placa única Jetson Nano, también denominado sistema de desarrollo embebido desarrollado por el distribuidor NVIDIA Corporation, es un elemento que presenta una velocidad de procesamiento de imágenes digitales superior a la de otros controladores gracias a su unidad de procesamiento gráfico (GPU, por sus siglas en inglés). Esta unidad le permite realizar operaciones en paralelo, ideal para optimizar el procesamiento de datos. Debido a sus ventajas presentadas y a sus dimensiones adecuadas para el minimizar el tamaño del *enclosure* principal se selecciona este computador el cual se puede apreciar en la figura 5.9.

Figura 5.9: Computador Jetson Nano (Fuente: www.nvidia.com).

Las características más importantes de este componente se muestran en la tabla 5.14.

Tabla 5.14: Características del computador seleccionado (Fuente: www.nvidia.com, www.amazon.com).

Voltaje (VDC)	Corriente máxima (A)	Interfaces	Dimensiones (mm)	Costo (USD)
5	2.5	UART, SPI, I ² C, USB	100 × 80 × 28	108.95

Como se mencionó en la selección de las luces submarinas, estas deben ser controladas por una señal PWM. No obstante, el computador seleccionado no posee una solución por *hardware* que genere este tipo de ondas cuadradas con alta precisión, lo que podría dificultar el control de los elementos de iluminación. En este sentido, la implementación de un microcontrolador posibilita generar adecuadamente este tipo de señales y cuenta con un ADC incorporado, útil para sensar el voltaje de la batería y determinar su carga restante. Por ello, es necesario utilizar este componente para las funciones descritas y que permita su comunicación por medio de la interfaz UART a un voltaje lógico de 3.3 V. En la tabla 5.15 se muestran las opciones encontradas de las cuales todas poseen las siguientes interfaces: UART, SPI, I²C, CAN, PWM y ADC.

Tabla 5.15: Microcontroladores encontrados (Fuente: www.st.com, www.pjrc.com, www.ti.com).

Microcontrolador	Voltaje (VDC)	Corriente máxima (mA)	Dimensiones (mm)	Costo (USD)
Blue Pill	5	125	52 × 22	5.00
TM4C123GH6PM	5	190	65 × 50	17.28
Teensy 3.2	5	185	18 × 36	19.80

Se selecciona el módulo Blue Pill debido a su costo significativamente inferior y sus dimensiones reducidas; este componente se puede apreciar en la figura 5.10. A su vez, este componente servirá para controlar los indicadores submarinos.



Figura 5.10: Microcontrolador Blue Pill (Fuente: www.mercadolibre.com.pe).

Algunas características adicionales se muestran en la tabla 5.16.

Tabla 5.16: Características del microcontrolador Blue Pill (Fuente: www.st.com).

Corriente por pin (mA)	Velocidad de reloj (MHz)	Resolución de ADC (bits)	Memoria Flash (KB)
25 (máx.)	72 (máx.)	12	128

- **Pantalla para visualización**

Como parte de la interfaz del usuario, es necesaria una pantalla para visualizar lo que el sistema está captando y mostrar información del sistema: carga restante de batería, profundidad de sumersión y memoria disponible. Estas pantallas deben ser de dimensiones reducidas, con un tamaño máximo de 3 pulg (76.2 mm). Las opciones encontradas se muestran en la tabla 5.17.

Tabla 5.17: Pantallas de visualización encontradas (Fuente: www.amazon.com, www.adafruit.com).

Pantalla	Resolución (píxel)	Diagonal* (mm)	Interfaz	Costo (USD)
ILI9341	320 × 240	73	SPI	17.39
ST7735R	128 × 160	66	SPI	19.95
Raspberry Pi Zero W Screen	640 × 480	85	UART	24.99

(*): Valores aproximados

Se descarta la pantalla Raspberry Pi Zero W Screen debido a que la interfaz de comunicación no es lo suficientemente rápida para transmitir imágenes en un tiempo reducido. Por ello, se selecciona la pantalla ILI9341 (ver figura 5.11) la cual posee un costo inferior a las otras, mayor resolución y es posible conseguirla en el mercado local. Esta pantalla es alimentada con un voltaje de 3.3 V y opera a una corriente máxima de 80 mA, aproximadamente.



Figura 5.11: Pantalla de 2.2 pulg ILI9341

(Fuente: www.amazon.com).

- **Regulador de voltaje**

Este elemento permite acondicionar el voltaje de alimentación de 12.6 V (ver inciso 5.1.4) a un valor de 5V (*step-down*) para alimentar el computador, microcontrolador y circuitos de control adicionales. La corriente máxima que soporta el regulador debe ser mayor a la corriente total de 3.7 A que consumen los elementos descritos (ver tabla 5.18).

Tabla 5.18: Corriente consumida de los componentes de control (Fuente: Elaboración propia).

Componente	Corriente individual (mA)	Cantidad	Corriente Total (mA)
Bar30	1.25	1	1.25
BNO055	12.30	1	12.30
Low-light HD USB camera	220.00	2	440.00
e-CAM82_USB	220.00	1	220.00
Sensor de fuga	20.00	1	20.00
Indicador submarino	30.00	3	90.00
Jetson Nano	2500.00	1	2500.00
Blue Pill	150.00	1	150.00
Pantalla 2 pulg ILI9341	80.00	1	80.00
Componentes adicionales	100.00	1	100.00
Consumo total (mA)			3613.55

En este sentido, los reguladores encontrados que cumplen con la capacidad de corriente mínima requerida se presentan en la tabla 5.19.

Tabla 5.19: Reguladores de voltaje encontrados (Fuente: www.amazon.com, www.naylampmechatronics.com, www.bluerobotics.com).

Regulador	Rango de voltaje (VDC)	Dimensiones (mm)	Eficiencia (%)	Costo (USD)
XL4015	8 – 36 → 1.25 – 32	54 × 23 × 15	96	2.50
XL4016	8 – 40 → 1.25 – 36	65 × 47 × 28	94	10.00
UBEC 5V power supply	7 – 26 → 5	37 × 19 × 6	~100	22.00

Se selecciona el regulador XL4015 (ver figura 5.12) debido a su costo, dimensiones reducidas y posibilidad de conseguir el producto en el mercado local.



Figura 5.12: Regulador de voltaje XL4015

(Fuente: www.amazon.com).

- **Cables para aplicaciones submarinas y comunicación con ROV**

Como se mencionó en el diseño conceptual del sistema (ver capítulo 3), los *enclosures* secundarios contendrán los indicadores luminosos y *switches* para la interacción con el usuario. En este sentido, es necesario adquirir cables que permitan la comunicación entre los *enclosures* principal y los secundarios, y sean destinados para su uso en aplicaciones de alta presión en ambientes submarinos. Este cable compuesto debe

poseer el número mínimo de vías internas para comunicación (ver tabla 5.20) para permitir transmitir la información de las cámaras, *switches* e indicadores.

Tabla 5.20: Conexiones internas requeridas (Fuente: Elaboración propia).

Componente	Número de conexiones	Cantidad	Conexiones totales
Cámara	4	1	4
Switch submarino	2	1	2
Indicador submarino	2	1	2
Número total de conexiones internas			8

Se selecciona el componente Fathom ROV Tether del distribuidor BlueRobotics, destinado para aplicaciones submarinas, el cual posee 8 cables internos para transmitir información. Algunas características adicionales, la longitud requerida y la cantidad de piezas requerida se presentan en la tabla 5.21.

Tabla 5.21: Características del cable submarino (Fuente: www.bluerobotics.com).

Diámetro (mm)	Calibre de cables (AWG)	Longitud requerida (m)	Cantidad	Costo (USD)
7.6	26	2	4	40.00

Finalmente, se seleccionará el *penetrator* DBH13M de 13 pines (ver figura 5.13) de la empresa MacArtney para la comunicación Sistema-ROV a través de ethernet, y permitir la alimentación de las luces submarinas. Cabe resaltar que este conector soporta profundidades de hasta 3000 m y puede ser insertado en un agujero M14.

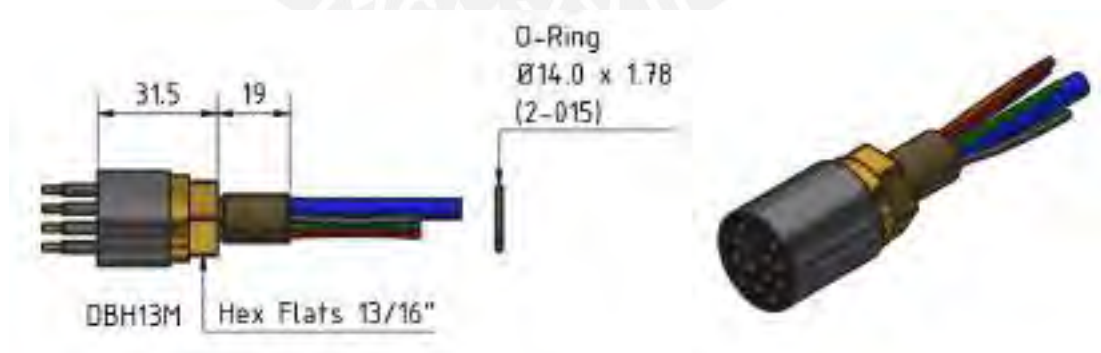


Figura 5.13: Conector DBH13M (Fuente: www.macartney.com).

- **Módulo de activación de alimentación del sistema**

Con el fin de facilitar el control de la alimentación, es necesario incluir un elemento que permita activar o desactivar el paso de corriente hacia el sistema por medio de una

señal digital. En este sentido, este componente debe ser capaz de soportar la corriente máxima de operación del sistema: $I_{m\acute{a}x} = 3.7 + 6 = 9.7 \text{ A}$. Se selecciona el módulo relé de 5 V (ver figura 5.14) el cual es capaz de trabajar a esta corriente mínima y posee dimensiones reducidas.



Figura 5.14: Módulo relé 5V a 1 canal (Fuente: www.mastertronicventas.com).

Las características más importantes de este componente se muestran en la tabla 5.24.

Tabla 5.22: Características del módulo seleccionado (Fuente: www.mastertronicventas.com).

Voltaje (VDC)	Corriente máxima (A)	Voltaje máximo de trabajo (VDC)	Dimensiones (mm)	Costo (USD)
5	10	25	34 × 25 × 17	1.97

5.1.4 Cálculo de consumo energético y selección de batería

Como se mencionó en la matriz morfológica (ver capítulo 3, inciso 3.3) se utilizará una batería de iones de litio. Este tipo de baterías están compuestas por celdas unitarias de alta densidad energética ideales para aplicaciones con poco espacio y de alta potencia. Otra ventaja es la posibilidad de obtener diferentes niveles de voltaje y capacidad variando el número de celdas utilizadas; en este sentido, se pueden encontrar baterías con voltajes máximos que son múltiplos de 4.2 V (voltaje de una celda). Adicionalmente, se debe considerar que una batería con voltaje elevado implicará un mayor uso de espacio y mayor consumo de potencia en el regulador de voltaje.

Por ello, teniendo en cuenta que el rango de voltaje de suministro para las luces submarinas se encuentra entre 7 – 48 V, se selecciona un banco de baterías 3S 12.6 V. En la tabla 5.23, se presenta la potencia total consumida y la capacidad necesaria de la batería, considerando un factor de seguridad de 1.3 y un tiempo de operación de 30 min como se mencionó en la lista de requerimientos (ver capítulo 3, inciso 3.1). Cabe

mencionar que, en el modo de uso por ROV, esta batería solamente alimentará a los sensores y componentes de control.

Tabla 5.23: Consumo energético de componentes (Fuente: Elaboración propia).

Componente	Corriente individual (A)	Voltaje (VDC)	Potencia individual (W)	Cantidad	Potencia Total (W)
Bar30	0.002	3.30	0.005	1	0.005
BNO055	0.012	3.30	0.04	1	0.04
Consumo del subsistema de estimación de posición (W)					0.05
Low-light HD camera	0.22	5.00	1.10	2	2.20
e-CAM82_USB	0.22	5.00	1.10	1	1.10
Lumen subsea light	1.19	12.60	15.00	4	60.00
Consumo del subsistema focal y de iluminación (W)					63.30
Sensor de fuga	0.02	5.00	0.10	1	0.10
Indicador submarino	0.03	5.00	0.15	3	0.45
Jetson Nano	2.50	5.00	12.50	1	12.50
Blue Pill	0.15	5.00	0.75	1	0.75
ILI9341	0.08	3.30	0.26	1	0.26
XL4015	5.00	7.60	38.00	1	38.00
Consumo de los componentes de control (W)					52.06
Consumo total (W)					115.41
Capacidad necesaria de batería (Ah)					5.95

Se selecciona un banco de baterías 3S 12.6 V a 6.4 Ah (voltaje mínimo de 9V), este posee un costo de 61.95 USD y se puede conseguir en el mercado local. Este componente cuenta con unas dimensiones máximas de 80 × 50 × 70 mm (ver figura 5.15), adecuadas para su uso en el *enclosure* principal.



Figura 5.15: Batería 12.6 V a 6.4 Ah seleccionada
(Fuente: DOC Electronic PERU).

5.2 Diseño de los circuitos de control

En esta sección, se presentarán los circuitos desarrollados para el control de procesos y recepción de indicadores del sistema de adquisición de imágenes submarinas. Así, el microcontrolador estará unido a la placa de circuito impreso al igual que el IMU.

5.2.1 Diseño del circuito de protección ante ingreso de agua

El circuito de protección se basa en un circuito *latch*, el cual es un circuito usado para almacenar información digital de naturaleza transitoria (Bannister & Whitehead, 1987), el cual puede ser encontrado en el mercado local. No obstante, la desventaja de su uso es que las salidas de estos módulos presentan un estado indeterminado al alimentarlos por primera vez, por lo que no se tendrá certeza del estado inicial. Por ello, se propone diseñarlo con elementos electrónicos pasivos para tener un control absoluto de este. Este circuito está alimentado directamente por la batería (V_{DD}) y será controlado por el microcontrolador. A su vez, consta de tres entradas (voltaje entrada V_{in} , *switch* de activación *PSW* y *switch* principal *MSW*) que, dependiendo de sus valores, permiten cambiar el estado del sistema cambia modificando el valor del voltaje de salida (V_{out}) que estará directamente conectado a la entrada de control del módulo relé (ver figura 5.16).

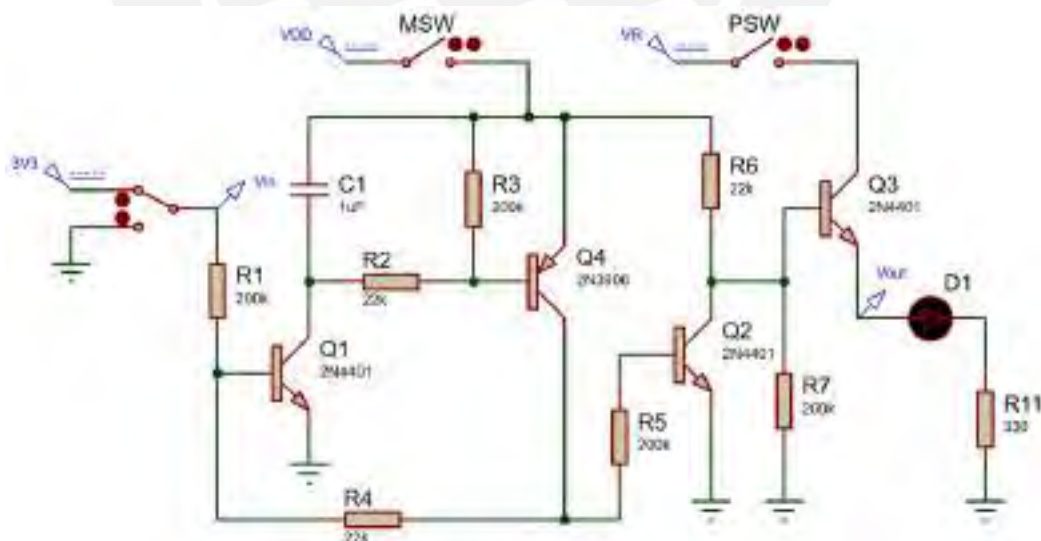


Figura 5.16: Circuito *latch* para control de alimentación (Fuente: Elaboración propia).

Los valores de las resistencias han sido obtenidos de acuerdo a las condiciones de saturación y corte de los transistores, y la justificación a través de cálculos de cada componente se presenta en el Anexo B.13.

Este circuito posee cuatro estados posibles, considerando que el *switch* principal servirá para reiniciar completamente el sistema. El primer estado ocurre cuando el *switch* de activación se encuentra abierto lo que impide el paso de corriente y por ende la activación de la alimentación del sistema. El segundo toma lugar cuando el *switch* de activación se encuentra cerrado y activa el voltaje de salida, y por ende el relé. El tercer estado ocurre cuando el voltaje de entrada tiene un valor de 3.3 V (valor lógico del microcontrolador cuando se detecte ingreso de agua) y permita la activación de los transistores conectando el voltaje de salida con tierra, desactivando el relé. Así, al pasar del tercer al cuarto estado desactivando el voltaje de control, debido a que existe una realimentación entre los transistores, estos no se desactivarán permitiendo mantener desactivado el driver. Los resultados de la simulación se muestran en la figura 5.17.



Figura 5.17: Voltajes de entrada y salida del primer (a), segundo (b), tercer (c) y cuarto estado (d) del circuito *latch* para control de alimentación (Fuente: Elaboración propia).

5.2.2 Diseño del circuito para el sensado del voltaje de batería.

Debido a que el voltaje lógico del ADC incorporado en el microcontrolador es de 3.3 V, se propone incluir un circuito divisor de voltaje para impedir el sobrevoltaje y la saturación de este sensor. Este circuito se muestra en la figura 5.18, donde se ha simulado el voltaje máximo de la batería (V_{DD}) para validar que se encuentre dentro del rango aceptado.

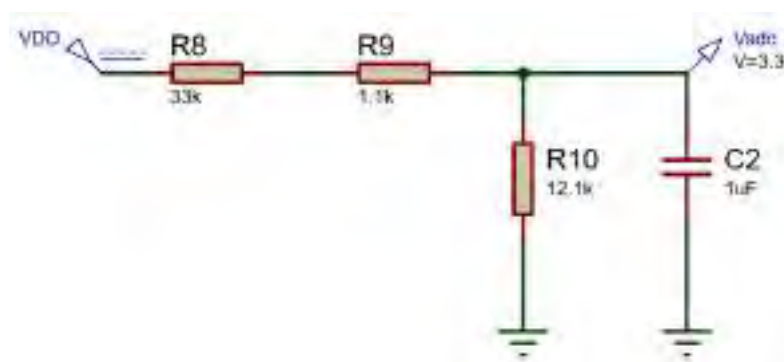


Figura 5.18: Circuito para sensado de voltaje de batería (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que el voltaje de salida máximo (V_{adc}) es de 3.3 V el cual cumple con el requerimiento. Así, se le ha adicionado un capacitor para eliminar el ruido eléctrico y las resistencias han sido obtenidas considerando los valores comerciales en el mercado local. Se seleccionó una resolución de 12 bits para el ADC considerando una resolución en la batería de 0.1% (ver los cálculos completos de diseño en el Anexo B.14). Finalmente, en la figura 5.19 se muestra el rango de reducción de voltaje.

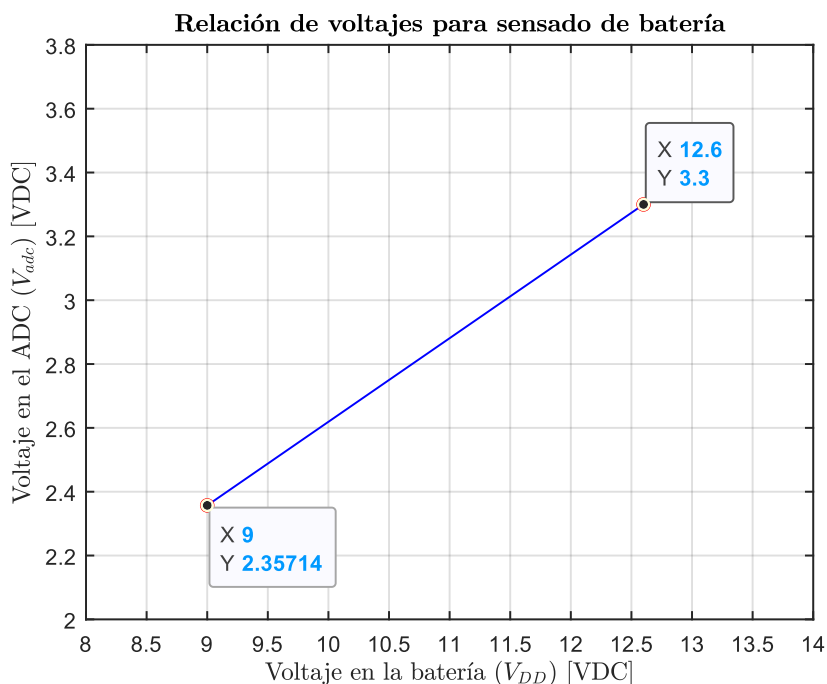


Figura 5.19: Gráfica de la relación de voltaje de batería y de entrada a ADC
(Fuente: Elaboración propia).

5.3 Elaboración de diagramas esquemáticos

En las figuras 5.20 y 5.21 se muestran los diagramas esquemáticos y conexiones del sistema de adquisición de imágenes submarinas para ambas configuraciones. Este consta de los elementos de control (circuito *latch* y divisor de voltaje), puertos utilizados del microcontrolador Blue Pill y el computador Jetson Nano, conexión con indicadores submarinos, conexión de los sensores a través de un bus I2C y conexión con la pantalla. En este sentido, los *switches* serán monitoreados por el microcontrolador e informará al computador el estado de estos a través comunicación serial UART. El microcontrolador y computador serán alimentados por el regulador, este último a través de su conector Power Jack. Finalmente, se muestran las conexiones con las borneras adicionales utilizadas para la distribución de alimentación.

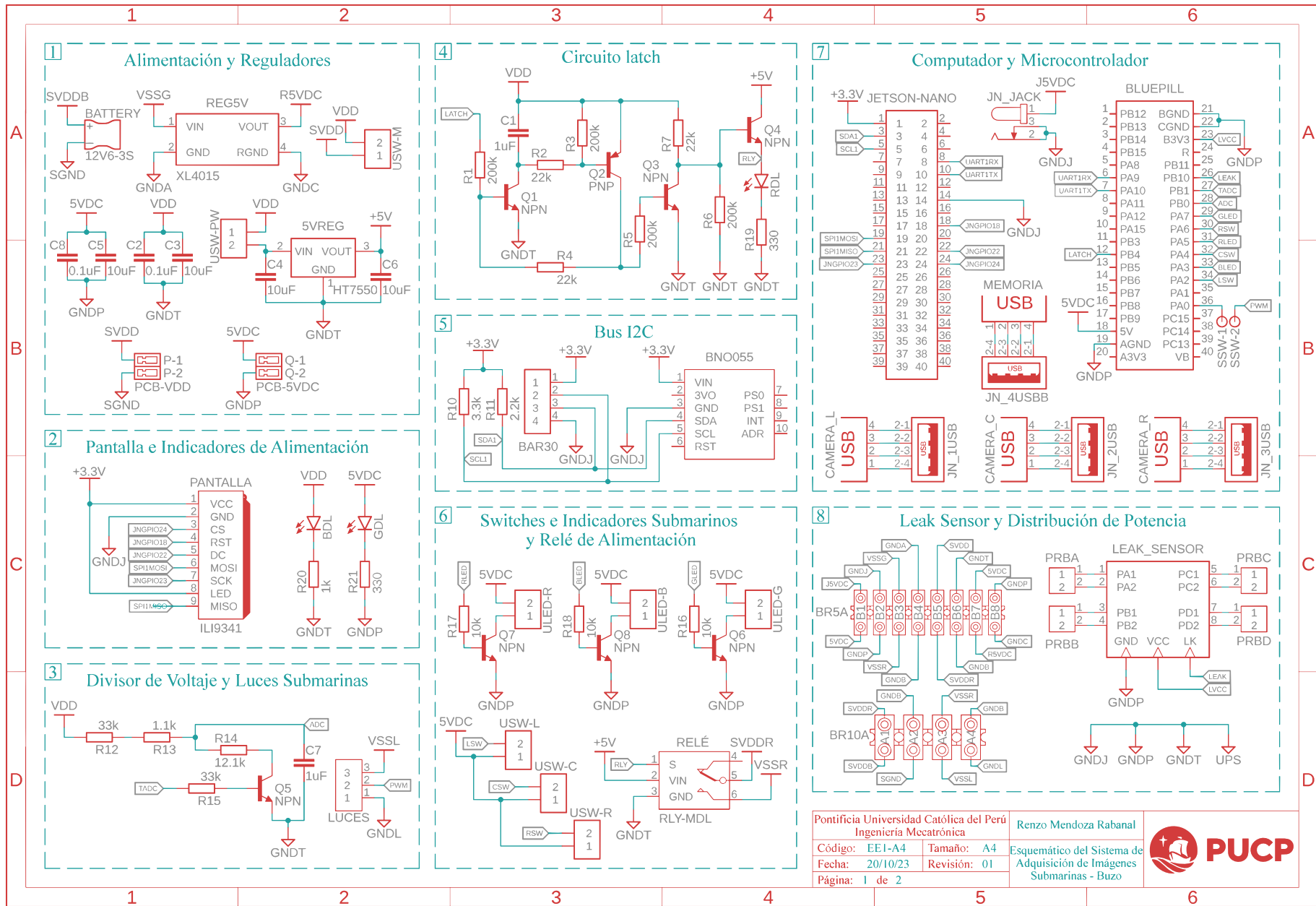


Figura 5.20: Diagramas esquemáticos del sistema – Buzo (Fuente: Elaboración propia).

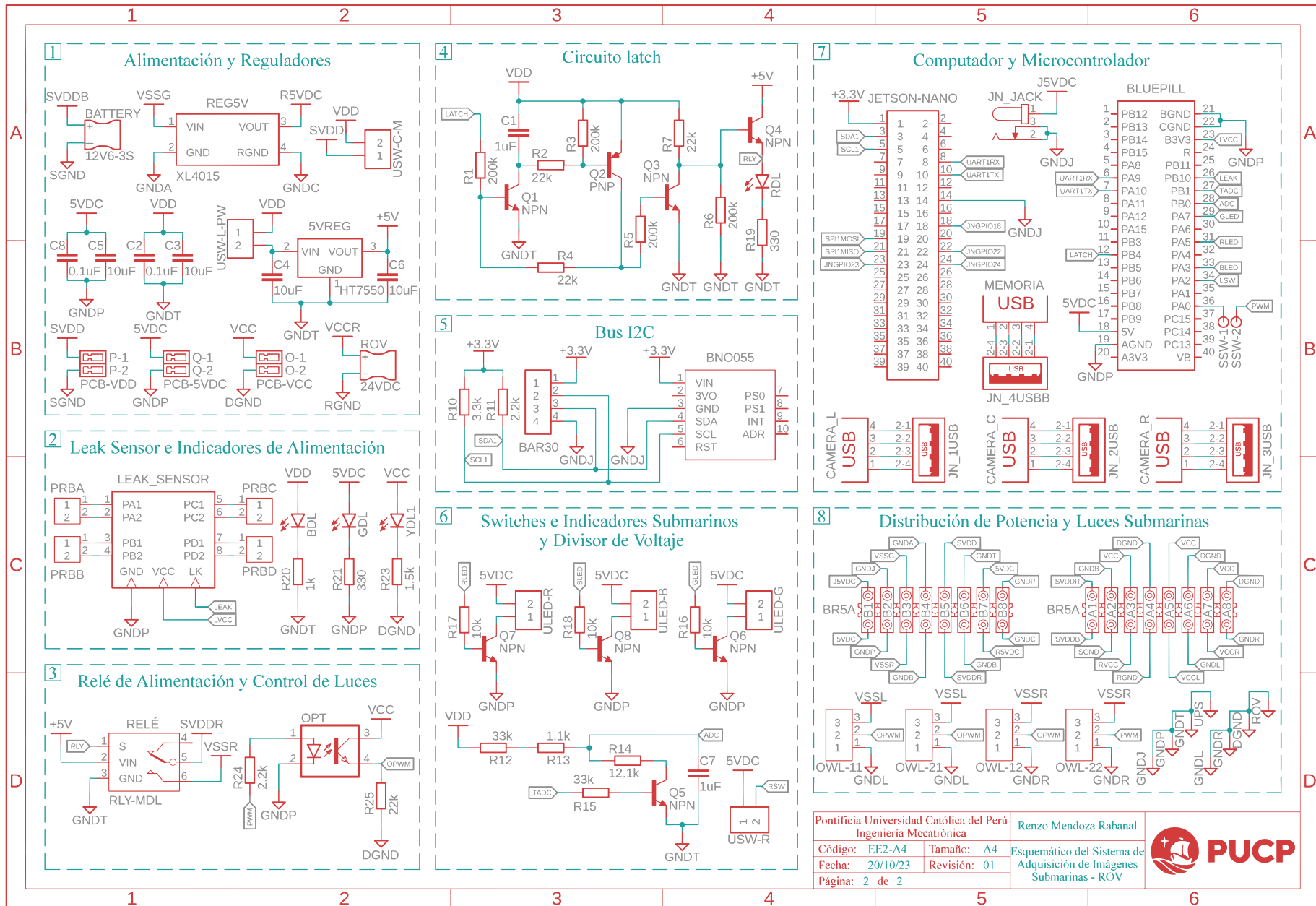


Figura 5.21: Diagramas esquemáticos del sistema – ROV (Fuente: Elaboración propia).

5.4 Diseño del *shield* y placa de circuito impreso

En la figura 5.21, se muestra la Placa de Circuito Impreso (PCB, por sus siglas en inglés) diseñada para la operación del sistema en ambos modos. Esta ha sido obtenida a partir de la herramienta ECAD proporcionada por el software Autodesk Fusion 360.

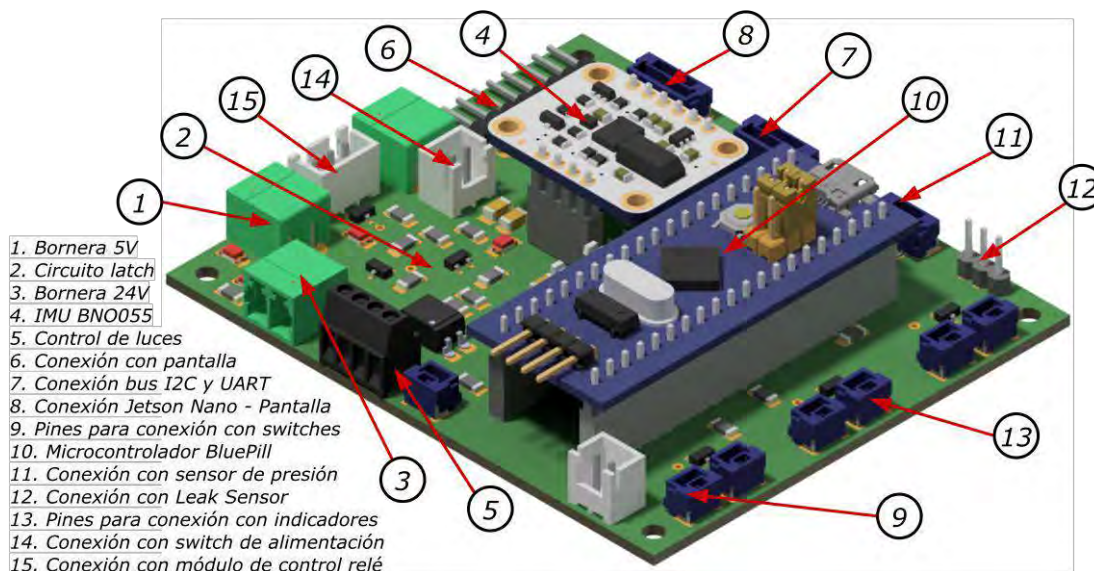


Figura 5.22: Placa de circuito impreso del sistema (Fuente: Elaboración propia).

La placa posee dimensiones de 82 mm de largo y 70 mm de ancho. La PCB posee tres borneras de alimentación: batería, que alimenta directamente el circuito *latch*; regulador de voltaje, para alimentar el controlador e indicadores submarinos; y voltaje de 24V, para la generación de la señal de control de las luces en el modo de uso por ROV. Por otra parte, los conectores que conectados a los *switches* están posicionados cercanos a los extremos que estarán contiguos al sello lateral con agujeros, facilitando su conexión. Se incluyó el microcontrolador y el IMU en esta placa para facilitar su fijación y evitar el uso de uniones atornilladas adicionales. Cabe resaltar que el sensor de fuga, pantalla y módulo relé se conectarán los componentes de control a través de la PCB. El componente 3D de esta placa se puede ver en el siguiente link.

Por otra parte, la PCB cuenta con conector para comunicar el bus I2C, el microcontrolador y la pantalla con el computador Jetson Nano. A partir de ello, se diseñó un *shield* que se colocará en los pines del computador y permitirá conectarse adecuadamente con la placa PCB. En la figura 5.23 se muestra el *Shield* diseñado para el computador Jetson Nano. El componente 3D de esta placa se puede ver en siguiente link.

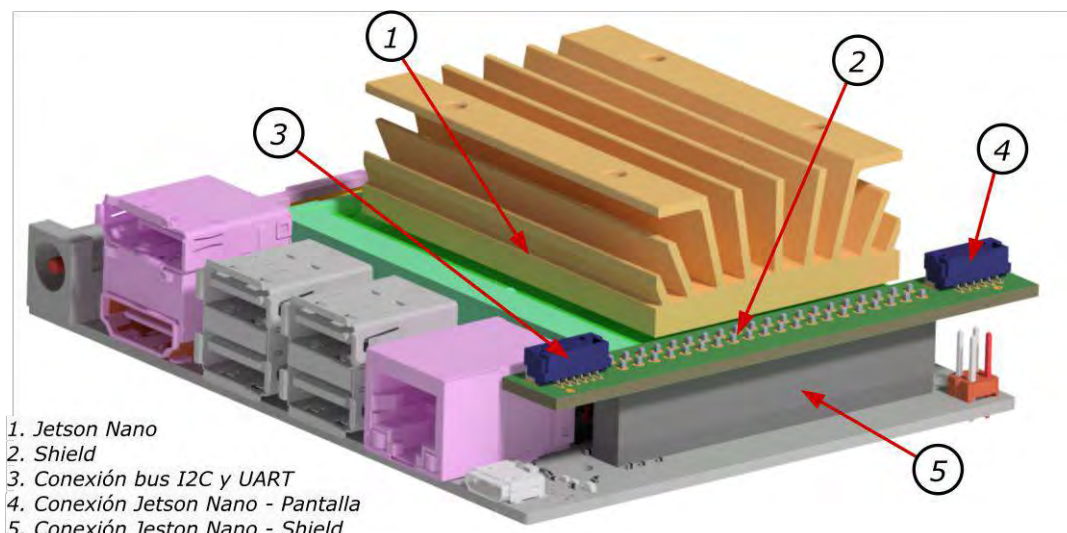


Figura 5.23: Shield para el computador Jetson Nano (Fuente: Elaboración propia).

En el Anexo F se presenta los diagramas esquemáticos y las vistas de las capas *top* y *bottom* de la PCB y el *shield* diseñados.

5.5 Distribución de componentes en el *enclosure* principal

En las figuras 5.24 y 5.25 se muestran la distribución de los componentes en el *enclosure* principal de cada configuración del sistema submarino. Para facilitar la distribución de la alimentación y conexiones de potencia a todos los módulos electrónicos se han agregado bornear aéreas de PVC, las conexiones de las borneras a cada elemento se pueden apreciar en los diagramas esquemáticos (sección 5.3). Cabe resaltar que el sensor de fuga posee espuma adhesiva que permite su adherencia a cualquier superficie, por lo que se la ubica contiguo a la PCB para facilitar las conexiones.



Figura 5.24: Componentes en el *enclosure* principal - Buzo (Fuente: Elaboración propia).

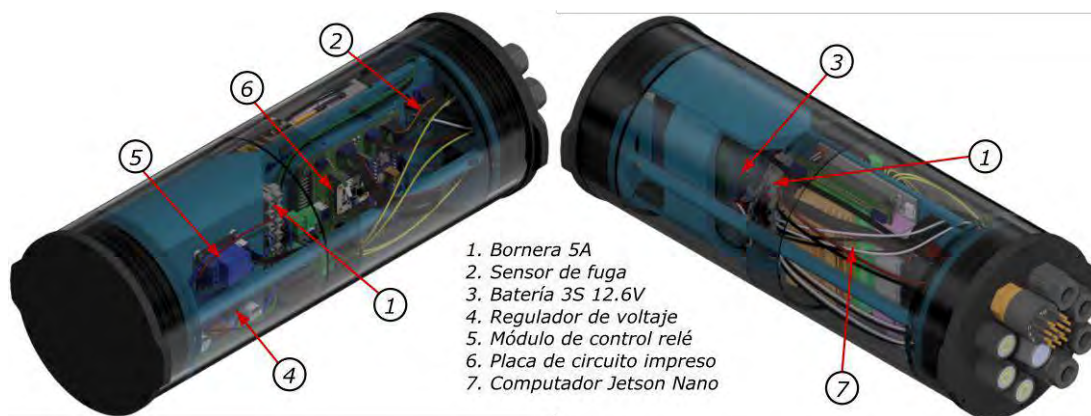


Figura 5.25: Componentes en el *enclosure* principal - ROV (Fuente: Elaboración propia).

5.6 Conexiones y cableado del sistema

En el sistema, la placa de circuito impreso, el computador, los módulos electrónicos y los elementos de distribución de potencia se encuentran conectados por cables. En este sentido, en la tabla 5.24 se muestran el calibre de los cables requeridos, su longitud y un enlace en línea donde se podrá apreciar las conexiones de todos los componentes. Cabe resaltar que en los *enclosures* secundarios no serán requeridos cables adicionales ya que se utilizarán los que se cables del Fathom ROV Tether y los que vienen en conjunto con las cámaras, *switches* e indicadores submarinos.

Tabla 5.24: Cables y conexiones en los *enclosures* (Fuente: Elaboración propia).

Componente	Cable	Color	Longitud (m)	Enlace del modelo
Enc. Secundario lateral	-	-	-	Wiring SLE
Enc. Secundario central - Diver	-	-	-	Wiring SCE-Diver
Enc. Secundario central - ROV	-	-	-	Wiring SCE-ROV
Enclosure principal - Diver	16 AWG	Rojo	0,25	Wiring PE-Diver
		Negro	0,25	
	18 AWG	Verde	0,50	
		Azul	0,50	
		Negro	2,00	
Enclosure principal - ROV	16 AWG	Rojo	0,50	Wiring PE-ROV
		Negro	0,50	
	18 AWG	Verde	0,50	
		Azul	0,50	
		Rojo	3,00	
		Negro	4,00	

CAPÍTULO 5

DISEÑO DE LA ETAPA DE CONTROL

En el presente capítulo, se mostrará el desarrollo del control de los componentes concernientes a la interfaz, subsistema de iluminación y estimación de posición del sistema. Primero, se presenta el diseño de la interfaz que posee como elemento principal la pantalla para visualización de la imagen actual de sentido y datos del sistema. Segundo, se muestra la estrategia de control propuesta para el control de la intensidad de iluminación de las luces submarinas. Finalmente, se muestran los algoritmos de estimación de desplazamiento mediante el uso del IMU y el sensor de presión.

6.1 Desarrollo de la interfaz

En este apartado se muestra el desarrollo de la interfaz del sistema considerando la selección de funciones de acuerdo a la activación de los *switches* submarinos y la información mostrada en la pantalla de visualización.

6.1.1 Esquematización de la lógica de activación de selectores

En la figura 6.1 se muestra la denominación de los *switches* e indicadores submarinos de acuerdo a su posición en el dominio mecánico del sistema. Tres de los *switches* conforman la interacción del operario con el sistema (derecha, centro e izquierda), y los restantes son los encargados de la activación de alimentación desde la batería hacia los elementos electrónicos y de control.

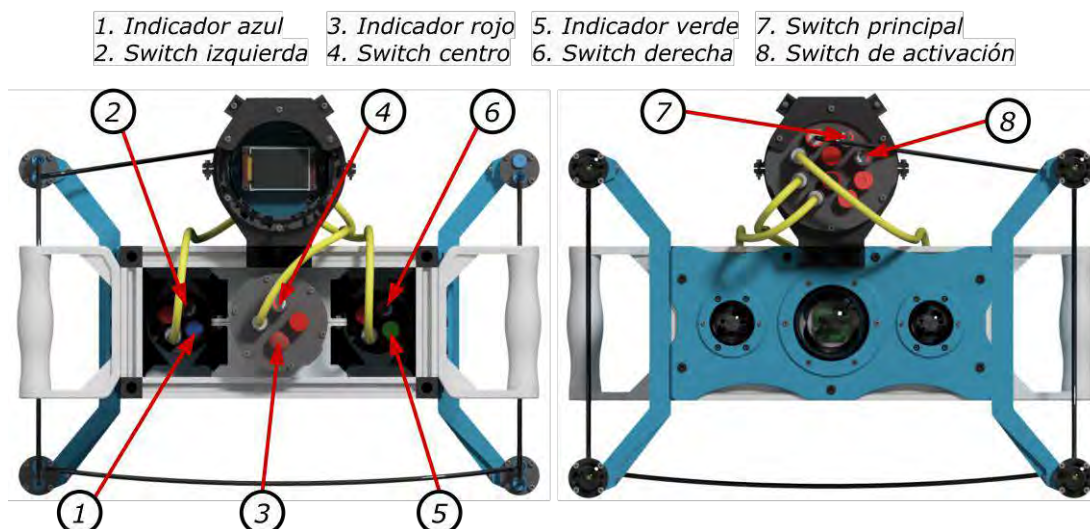


Figura 6.1: *Switches* del sistema de adquisición de imágenes (Fuente: Elaboración propia).




Cabe resaltar que durante el modo de uso por ROV solamente se contará con los tres *switches* ubicados en los *enclosures* secundarios, por lo que dos de estos servirán para controlar la activación de la alimentación. En la tabla 6.1, se muestra la función de cada *switch* en cada modo de uso

Tabla 6.1: Funciones de *switches* submarinos (Fuente: Elaboración propia).

Componente	Modo Buzo	Modo ROV
Switch izquierda	Activa/Desactiva la operación de las luces submarinas	Función del switch de activación
Switch centro	Activa/Desactiva de la adquisición de imágenes	Función del switch principal
Switch derecha	Activa/Desactiva el control de iluminación, al desactivarlo las luces operan a máxima intensidad	
Switch principal	Activa/Desactiva la energización completa del sistema	-
Switch de activación	Activa/Desactiva el funcionamiento del sistema	-

Por otra parte, el sistema puede encontrarse en estados diferentes referidos a la operación y la transición entre etapas. En este sentido, se propone asignar dos estados por cada indicador submarino: indicador submarino activado de forma continua e indicador submarino activado de forma intermitente (con un periodo de 0.5 segundos). En la tabla 6.2, se muestran los tipos de señales de los indicadores submarinos y el significado de estos en correlación con el estado del sistema.

Tabla 6.2: Estados del sistema – Indicadores submarinos (Fuente: Elaboración propia).

Indicador	Señal	Estado	Descripción
 Verde	Intermitente	Inicialización del Sistema	El sistema se encuentra iniciando los algoritmos e interfaz del usuario. Duración aproximada: 30 s.
	Continua	Sistema Operativo	El sistema se encuentra operativo y a la espera de instrucciones para su funcionamiento.
 Azul	Intermitente	Algoritmo de control de luces activado	El algoritmo de control de luces adaptativo se encuentra activado durante la adquisición de imágenes.
	Continua	Adquisición de Imágenes Activada	La función de adquisición de imágenes ha sido activada.
 Rojo	Intermitente	Batería Baja / Espacio de Almacenamiento Reducido	La carga de la batería está por debajo del 30% o solamente se cuenta con 20% del espacio total de almacenamiento.
	Continua	Ingreso de Agua al Sistema	Se ha detectado ingreso de agua al sistema y se procederá a la desactivación del sistema. Duración: 10 s.

6.1.2 Diseño de la interfaz en el panel HMI

El medio principal de interacción del sistema con el operario es a través de la pantalla.

La información que esta mostrará está compuesta por los siguientes datos:

- Imagen adquirida: Imagen de enfoque de la cámara central del sistema.
- Nivel de batería: Porcentaje de batería restante.
- Profundidad de sumersión: Distancia bajo el nivel del mar actual del sistema.
- Memoria restante: Porcentaje de memoria disponible para el registro de imágenes.
- Tiempo de operación: Tiempo transcurrido desde la activación del sistema

En la figura 6.2 se muestra el formato de imagen mostrado en la pantalla de visualización con la información especificada.



Figura 6.2: Formato de imagen mostrada (Fuente: Elaboración propia).

6.2 Diseño del control de iluminación adaptativo

En este inciso se planteará la ley de control adaptativo de las luces submarinas de acuerdo a los parámetros característicos de las imágenes. Como se mencionó se incluirá la información obtenida del histograma y la profundidad actual de sumersión.

6.2.1 Descripción de los parámetros en la iluminación de una imagen

Uno de los métodos con mayor uso para determinar la intensidad de iluminación de una imagen de acuerdo al valor digital de sus pixeles es el histograma. Este está relacionado con la apariencia de la imagen y, a su vez, con el contraste de esta (Bannister & Whitehead, 1987). En la figura 6.3 se muestran diferentes distribuciones de histogramas.

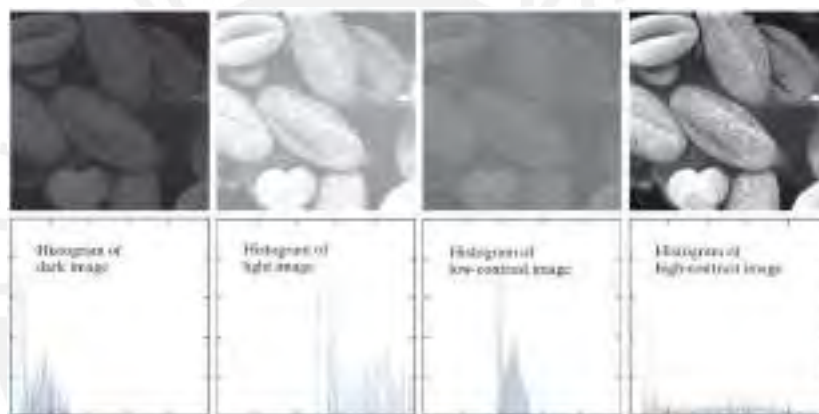


Figura 6.3: Histograma y su relación con el contraste de diferentes imágenes (Fuente: Bannister & Whitehead).

Como se puede apreciar, las dos primeras imágenes poseen una tendencia de intensidad de pixeles en los extremos lo cual no muestra un resultado apropiado. Por otra parte, la tercera imagen posee una intensidad intermedia, pero con un rango reducido lo cual, al igual que las primeras imágenes, no presentan resultados adecuados. Finalmente, la última imagen presenta un rango amplio de tonos y alto contraste, lo cual produce mejores resultados con respecto a los detalles y formas de las figuras.

Se puede concluir que una imagen con buen contraste permite obtener mejores resultados con respecto a los otros tipos de iluminación, y esto permite diferenciar los objetos, características y formas de una imagen. Por ello, se utilizará, para el lazo de

control, la imagen previamente adquirida después de aplicarle una ecualización y así modificar su histograma para aumentar su contraste y establecer una referencia.

6.2.2 Propuesta de la estrategia de control

Se denomina al algoritmo como control adaptativo ya que permite configurar y modificar la señal de control ante el cambio de la naturaleza de la planta. Este algoritmo regula la referencia para adaptarse a la iluminación ideal captada por las cámaras. La ley de control propuesta en este trabajo de tesis se basa en dos componentes principales que se relacionan con la profundidad actual de sumersión y el error debido al contraste deseado de la imagen:

$$e(t) = \frac{1}{I_w} \frac{1}{I_h} \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h I_{eq_{ij}}^{\eta}(t) - I_{ij}(\tau),$$

$$v(t) = k_p(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau - \frac{\beta}{T_1} \int_{t-T_1}^t e(\tau) d\tau$$

$$u(t) = \text{sigmoid}(v(t) + \mu \delta(t)^\theta).$$

Donde:

- e : Error producto de la referencia y la salida de la planta, en int. pxl.
- I_w : Cantidad de pixeles en ancho de la imagen, adimensional.
- I_h : Cantidad de pixeles en alto de la imagen, adimensional.
- $I_{ij}, I_{eq_{ij}}$: Pixel (i, j) de las imagen original e imagen ecualizada, adimensional.
- δ : Profundidad actual de sumersión, en m.
- β, μ : Constantes proporcionales, adimensional.
- k_p, k_i : Constantes de la acción proporcional-integral, adimensional.
- v : Controlador proporcional-integral, adimensional.
- η, θ : Constantes de regulación, adimensional.
- u : Acción de control sobre el sistema, en %PWM.
- T_1 : Periodo de tiempo de media del error, en s.

Se trabajará con un controlador proporcional-integral. La componente proporcional permite que el sistema responda rápidamente, y la componente integral se encarga de reducir el error en estado estacionario al mínimo ante una referencia. En este caso de análisis, se espera que la imagen ecualizada sea la misma a partir de diferentes tomas de la imagen con iluminación semejante, por ello, la referencia será constante en el estado estacionario. A partir de ello, ya que se considera a la imagen ecualizada una

imagen con características ideales, no se podrá obtener un error nulo con el algoritmo de control. Por ello, la propuesta de control se enfocará en reducir el error al mínimo con la menor iluminación posible y optimizar la energía utilizada. El error mínimo alcanzado se espera que sea constante y se denominará **error remanente**.

Se optó por no adicionar un componente derivativo ya que su efecto genera inestabilidad, lo que se pudo apreciar en pruebas preliminares, debido al tiempo de muestreo reducido que es igual a tasa de adquisición de imágenes de 1 fps (frecuencia de adquisición de la cámara principal). Además, se utilizará un componente de corrección obtenido a partir del valor medio de la señal del error en una ventana de tiempo de amplitud T_1 . Esta componente se añadió después de realizar las pruebas iniciales (ver capítulo 7, inciso 7.3.3), únicamente utilizando el controlador proporcional-integral. Las dos funciones principales de esta componente son:

- Evitar la saturación en la señal de control: Debido a la acumulación del error en el control integral, y al error remanente, la señal de control se saturará en el estado transitorio y estacionario. Por ello, se le añade esta corrección de tal forma que, al alcanzar el error remanente, se limite el efecto de la componente integral.
- Disminuir el efecto oscilatorio: Es posible que en el estado estacionario se generen oscilaciones alrededor del punto de operación óptimo. Por ello, esta componente limitará este efecto permitiendo que el error alcance un valor continuo.

Adicionalmente, se incluyen las constantes de regulación para influir en los valores de la intensidad de pixeles de la imagen y el valor efectivo de la profundidad de sumersión. Debido a que la señal de control indica la intensidad de iluminación adecuada para la imagen captada en el enfoque actual de la cámara, es necesario que la velocidad de desplazamiento del sistema no sea elevada, de lo contrario la regulación de intensidad luminosa no será la adecuada. Esto debido a que un cambio rápido en la información de los pixeles (la que no puede ser estimado) podría cambiar drásticamente la señal de control requerida que no puede ser corregida con suficiente velocidad debido a la tasa de sensado reducida. Por otra parte, debido a la naturaleza y comportamiento altamente complejos para el modelamiento numérico de la planta y el actuador, que incluye la información de características reales de ambientes submarinos, se optó por sintonizar los parámetros del controlador través de la implementación del prototipo.

En la figura 6.4, se muestra el diagrama de bloques de la estrategia de control.

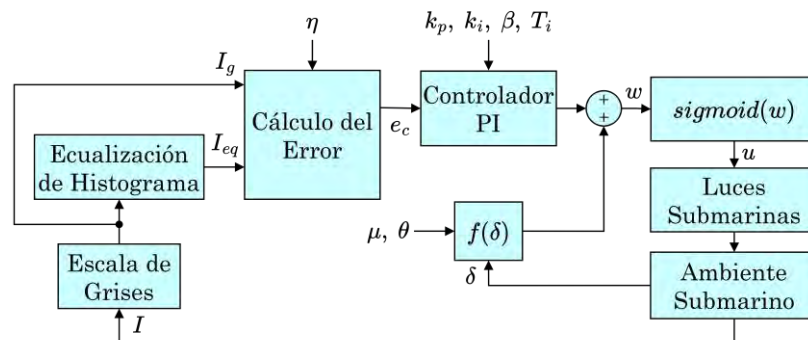


Figura 6.4: Diagrama de bloques de la estrategia de control (Fuente: Elaboración propia).

La función sigmoide es encargada de establecer el valor de la señal de control en el rango de $[0 - 1]$ con el fin de proveer una señal que indique el porcentaje de la intensidad luminosa requerida. Para la elección de parámetros del controlador se utilizó el método Ziegler-Nichols (ver capítulo 7, inciso 7.3.3). Además, se debe considerar que la señal del error de iluminación debe ser predominante con respecto a la señal de la componente de profundidad. Se requiere que la intensidad de píxeles de la imagen ecualizada sea mayor para que el rango de iluminación sea mayor y alcance objetos alejados. Cabe aclarar que la influencia de estos factores en el comportamiento y estabilización de la señal de control y error será analizada en las pruebas del prototipo implementado (ver capítulo 7).

6.2.3 Desarrollo algorítmico del controlador de iluminación

A partir de la ley de control presentada previamente, se desarrollará el algoritmo final a ser implementado en el computador. Primero, obtenemos la función transferencia del controlador en el dominio de Laplace:

$$\mathcal{L}\{v(t)\} = \mathcal{L}\left\{k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau - \frac{\beta}{T_1} \int_{t-T_1}^t e(\tau) d\tau\right\},$$

$$V(s) = k_p E(s) + k_i \frac{1}{s} E(s) - \frac{\beta}{T_1} \frac{1}{s} E(s) (1 - e^{-T_1 s}),$$

$$\frac{V(s)}{E(s)} = k_p + k_i \frac{1}{s} - \frac{\beta}{T_1} \frac{1}{s} (1 - e^{-T_1 s}).$$

Luego, debido a que el algoritmo se implementará en un computador con un periodo de muestreo $T = 1$ s (en el prototipo implementado), el algoritmo debe expresarse como una ecuación de diferencias. Por ello, se restringen los valores del retardo a múltiplos del periodo de muestreo, es decir, $T_1 = nT$. Así, aplicando la aproximación de Tustin (o aproximación bilineal) se obtiene:

$$\frac{V(z)}{E(z)} = k_p + k_i \frac{T}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} - \frac{\beta}{nT} \frac{T}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} (1-z^{-n}),$$

$$V(z)(1-z^{-1}) = \left[k_p(1-z^{-1}) + \frac{k_i T}{2} (1+z^{-1}) - \frac{\beta}{2n} (1+z^{-1})(1-z^{-n}) \right] E(z).$$

Se definen las siguientes constantes:

$$q_0 = k_p + \frac{k_i T}{2} - \frac{\beta}{2n}, q_1 = -k_p + \frac{k_i T}{2} - \frac{\beta}{2n}, q_2 = \frac{\beta}{2n},$$

$$V(z) = z^{-1}V(z) + q_0 E(z) + q_1 z^{-1}E(z) + q_2(z^{-n} + z^{-n-1})E(z).$$

La ecuación de diferencias está definida por:

$$v(k) = v(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-n) + q_2 e(k-n-1).$$

Por otra parte, si no se cuenta con información de la profundidad actual de sumersión en ambientes con escasa iluminación, se puede agregar un *offset* en la señal del controlador para estimular la planta e iniciar el control de la iluminación si el error no sobrepasa un umbral del 15%, el cual es un valor estándar para que la cámara pueda captar características mínimas (obtenido experimentalmente). Finalmente, el diagrama de flujo del algoritmo se muestra en la figura 6.5:

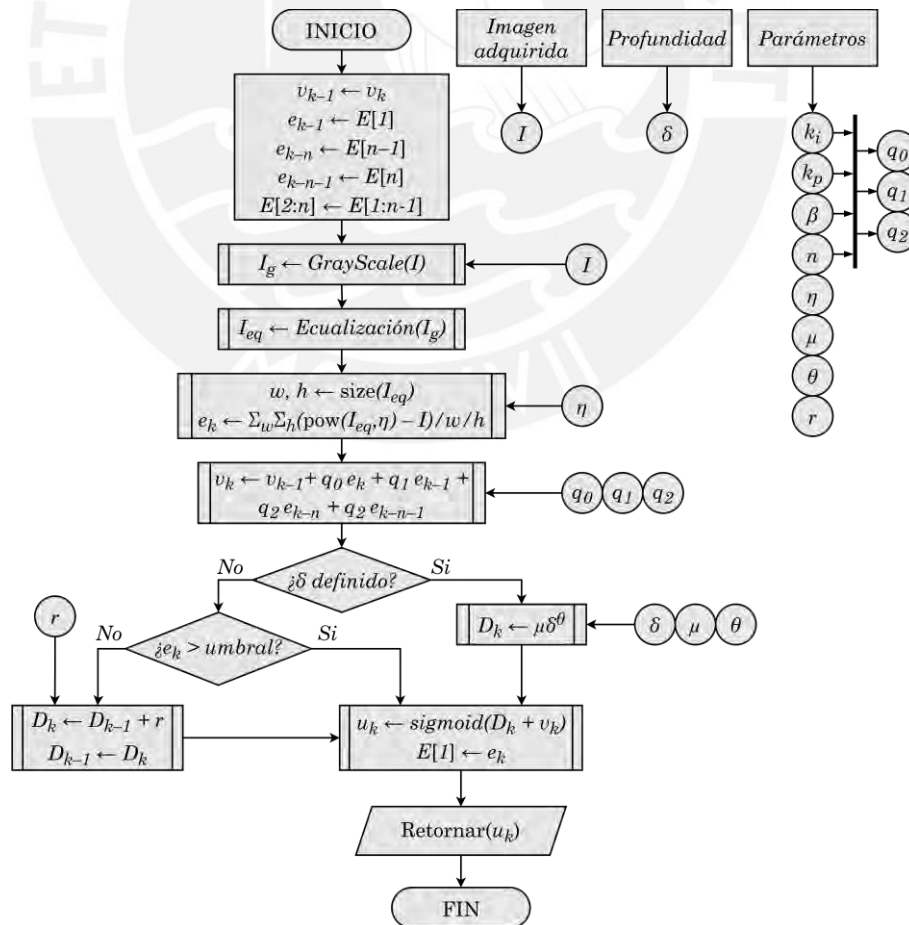


Figura 6.5: Diagrama de flujo del algoritmo de control (Fuente: Elaboración propia).

6.3 Estimación de posición del sistema en el entorno submarino

En esta sección, se presentarán los modelos utilizados para la estimación del desplazamiento del sistema de la adquisición de imágenes y la profundidad actual de sumersión mediante el uso un sensor inercial y un barómetro.

6.3.1 Estimación del desplazamiento mediante el uso de datos inerciales

Para estimar el desplazamiento del sistema se utilizará el filtro de Kalman debido a que el modelo matemático de este sistema es lineal y se asume que la aceleración lineal que provee el IMU posee una distribución de probabilidad normal con media cero. El modelo que permite predecir dicho desplazamiento se muestra a continuación (Thrun, 2002):

$$\begin{aligned}\bar{\mu}_t &= A\mu_{t-1} + B\mu_u, \\ \bar{\Sigma}_t &= A\Sigma_{t-1}A^T + R.\end{aligned}$$

Donde:

- $\bar{\mu}_t$: Predicción de estado actual.
- μ_{t-1} : Estado anterior.
- μ_u : Acción de entrada.
- Σ_{t-1} : Covarianza del estado anterior.
- $\bar{\Sigma}_t$: Covarianza de la predicción.
- R : Varianza del ruido de medición.
- A, B : Matrices del modelo de predicción.

En particular, la acción de entrada será la aceleración lineal absoluta que provee el IMU. Por lo tanto, el modelo para cada componente de desplazamiento será:

$$\begin{bmatrix} \bar{\mu}_{\dot{x},t} \\ \bar{\mu}_{\ddot{x},t} \\ \bar{\mu}_{x,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ dt & 1 & 0 \\ \frac{dt^2}{2} & dt & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{\dot{x},t-1} \\ \mu_{\ddot{x},t-1} \\ \mu_{x,t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \mu_{\ddot{x}},$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\mu}_{\dot{y},t} \\ \bar{\mu}_{\ddot{y},t} \\ \bar{\mu}_{y,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ dt & 1 & 0 \\ \frac{dt^2}{2} & dt & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{\dot{y},t-1} \\ \mu_{\ddot{y},t-1} \\ \mu_{y,t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \mu_{\ddot{y}},$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\mu}_{\dot{z},t} \\ \bar{\mu}_{\ddot{z},t} \\ \bar{\mu}_{z,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ dt & 1 & 0 \\ \frac{dt^2}{2} & dt & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{\dot{z},t-1} \\ \mu_{\ddot{z},t-1} \\ \mu_{z,t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \mu_{\ddot{z}},$$

Cabe resaltar que los valores de R deben obtenerse de la hoja de datos del componente, en particular de los datos proporcionados por el acelerómetro. En este sentido, el término dt hace referencia al paso de tiempo entre cada sensado de datos de la aceleración lineal del IMU (100 Hz).

6.3.2 Estimación de posición con el sensor inercial y barómetro

Uno de las ventajas del uso del filtro de Kalman es la posibilidad de mejorar la certeza con la que se estima el estado actual del sistema por medio de la corrección de esta mediante el uso de múltiples sensores. El modelo matemático que permite la corrección de estados y covarianza del modelo se muestra a continuación (Thrun, 2002):

$$\begin{aligned} K_t &= \bar{\Sigma}_t C^T (Q + C \bar{\Sigma}_t C^T)^{-1}, \\ \mu_t &= \bar{\mu}_t + K_t (z_t - C \bar{\mu}_t), \\ \Sigma_t &= (I - K_t C) \bar{\Sigma}_t. \end{aligned}$$

Donde:

- z_t : Medición del sensor obtenida.
- μ_t : Estado actual corregido.
- Σ_t : Covarianza del estado actual.
- Q : Varianza del ruido de medición.
- C : Matriz del modelo de medición.

La información obtenida a partir del barómetro será utilizada para corregir el desplazamiento vertical en el eje Z estimado desde la superficie del mar. Así, se tiene la siguiente matriz del modelo:

$$C_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho g \end{bmatrix}.$$

Donde ρ es la densidad del agua de mar y g es la aceleración de la gravedad. Finalmente, debido a que no se cuenta con sensores capaces de aportar a la estimación del desplazamiento en los ejes X e Y , el valor de predicción es el mismo al valor luego de aplicar la corrección, es decir: $\mu_t = \bar{\mu}_t, \Sigma_t = \bar{\Sigma}_t$. Así, la corrección de estados solamente se realizará cuando se obtenga nueva información del barómetro.

Finalmente, en la figura 6.6 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo completo que incluye el sensado de los datos inerciales y la presión obtenida del barómetro.

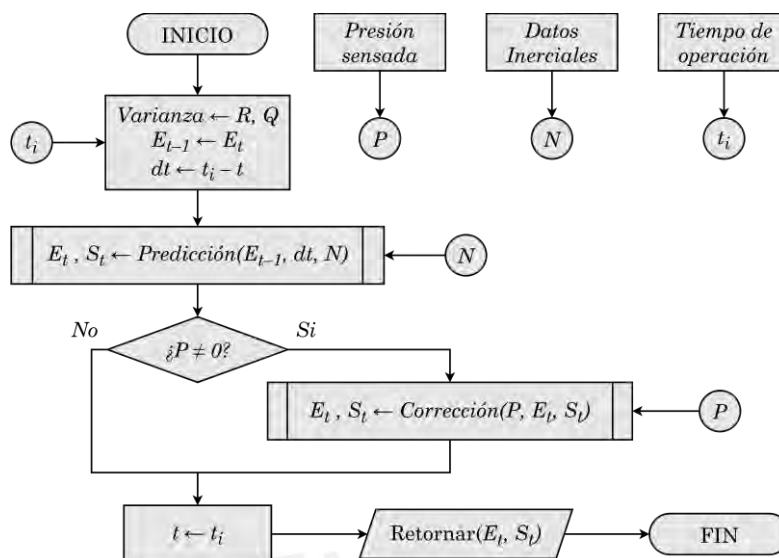


Figura 6.6: Diagrama de flujo del algoritmo de estimación de desplazamiento y orientación
(Fuente: Elaboración propia).

6.3.3 Simulación del algoritmo de estimación con datos inerciales

En la simulación se ha tomado en consideración las tres dimensiones espaciales durante el desplazamiento. Se asumirá que las varianzas del ruido son independientes unas de otros y son de la forma:

$$R_z = \begin{bmatrix} R_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, Q_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_z \end{bmatrix}.$$

Además, se considera que los sensores utilizados han sido calibrados, por lo que no se contempla la corrección de un *offset* presente en la medición. Por otra parte, se probará el algoritmo para entradas del tipo lineal. Así, a partir de las hojas de datos de los sensores propuestos en el capítulo 5, se puede deducir y asumir que las varianzas tienen los valores $R_z = 0.009$ y $Q_z = 0.005$.

En la figura 6.7 se muestra el resultado de la aplicación del filtro del Kalman durante un tiempo de 150 s. A pesar de la semejanza, la varianza final de las componentes de la posición tiene un valor de 119.33, lo que muestra que la certeza de encontrarse en la posición estimada es baja. Se propone el uso mediciones adicionales para que la estimación del desplazamiento del sistema sea corregida. Estas mediciones se pueden obtener a partir de las cámaras a través de algoritmos de visión por computadora en ambos modos de uso. Finalmente, en el modo de uso por ROV, se propone el uso de la información de la posición del ROV, que puede ser transmitida al sistema, para contar con mayor certeza en la estimación del desplazamiento.

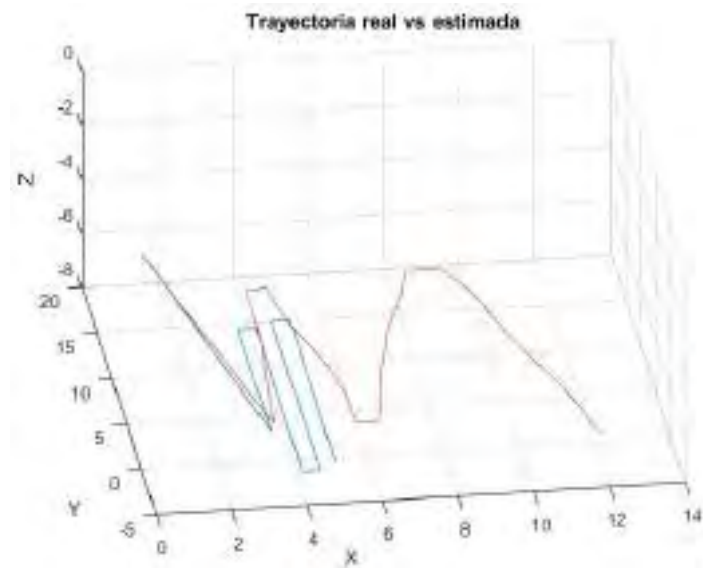


Figura 6.7: Gráfica de la trayectoria real y estimada (Fuente: Elaboración propia).

6.4 Descripción del proceso general de control

Los procesos principales se basan en la adquisición de imágenes submarinas, la estimación del desplazamiento y orientación, el control de iluminación adaptativo y el control de la interfaz de interacción con el operario. En la figura 6.8 se puede apreciar el diagrama de flujo general de control, el cual contiene las funciones del control de iluminación y estimación de desplazamiento y orientación, las cuales fueron presentadas en anteriormente. La función que se refiere al control de la interfaz genera la imagen a ser mostrada por la pantalla de visualización y controla los indicadores submarinos.

Por otra parte, al finalizar las tareas principales, se debe analizar si se detectó el ingreso de agua al *enclosure* principal. Si se detecta el ingreso de agua, en el modo de uso por buzo se activa el indicador rojo por 10 s y se desconecta la fuente de alimentación (por medio del circuito *latch*), en el modo de uso por ROV se envía una señal al vehículo submarino indicando el estado del sistema y se realiza el procedimiento de apagado (activación de indicador rojo y del circuito *latch*). Cabe resaltar que en el modo de uso por ROV, no se contará con la función referida al control de la interfaz del usuario (pantalla) ya que toda la información necesaria será enviada a través de ethernet.

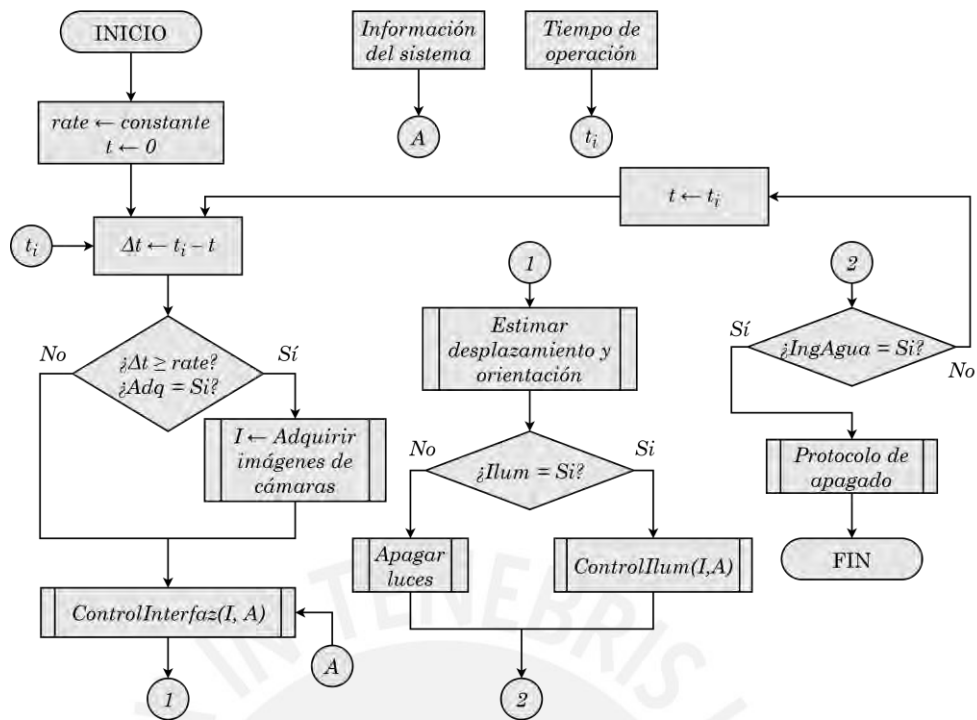


Figura 6.8: Diagrama de flujo general de control (Fuente: Elaboración propia).

CAPÍTULO 7

PROTOTIPADO DEL SISTEMA

En este capítulo se presentará el desarrollo del prototipo del sistema de adquisición de imágenes submarinas. Primero, se mostrará el modelo 3D y el prototipo implementado, mostrando sus componentes principales. Segundo, se presentarán los resultados de la aislación al entorno submarino, así como los resultados del rendimiento del sistema en relación a su tiempo efectivo de operación, imágenes adquiridas y pruebas del control de iluminación. Cabe resaltar que los códigos de programación utilizados en la implementación se muestran en el Anexo C.

7.1 Descripción del prototipo

En esta sección, se presentará el modelo 3D final, indicando sus componentes principales, y el prototipo implementado. Como se mencionó, debido a la complejidad de las piezas de conexión y de soporte, estas han sido fabricadas por impresión 3D.

7.1.1 Sistema integrado: modelo virtual

En la figura 7.1, se observa el modelo 3D del prototipo del sistema de adquisición de imágenes submarinas presenta un rango operacional máximo de 400 m, según las especificaciones técnicas de los productos comerciales adquiridos. Esta configuración está enfocada a su modo de uso por buzo y su operación será hasta 60 m de profundidad. Por otra parte, se muestra la configuración completa para su modo de operación por ROV, la cual es capaz de operar hasta una profundidad de 750 m.



Figura 7.1: Modelo 3D del sistema para modo de uso por buzo (superior) y para uso por ROV (inferior) (Fuente: Elaboración propia).

Cabe resaltar que para su uso por ROV, las cámaras deben ser orientadas con un ángulo de giro de 180°, ya que el sistema deberá operar en esta orientación para facilitar su acople con el ROV. En este sentido, no es necesario el uso de los sujetadores manuales para este modo de uso. Los modelos 3D se pueden visualizar en los siguientes enlaces: **Ensamble Buzo**, **Ensamble ROV**, **Sistema con Buzo** y **Sistema con ROV**.

7.1.2 Implementación del prototipo

En la figura 7.2, se muestra la distribución de componentes propuesta en la bandeja del *enclosure* principal.

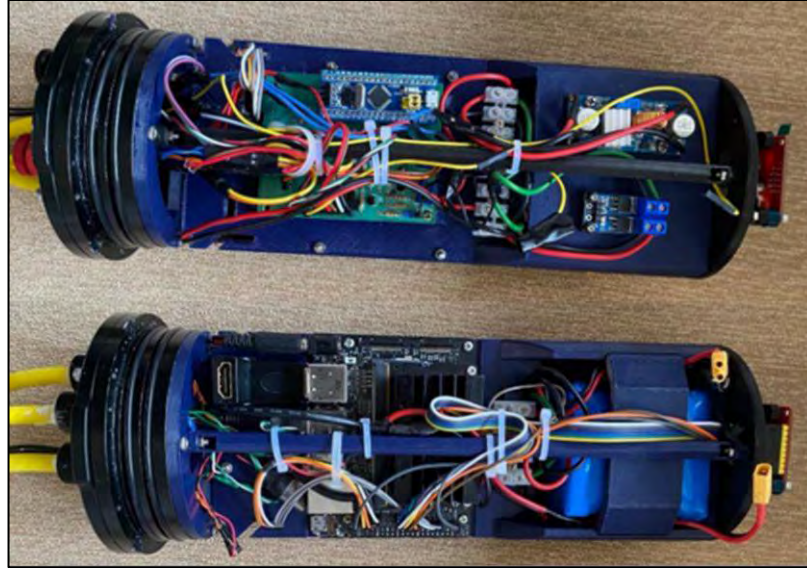


Figura 7.2: Componentes electrónicos en el *enclosure* principal (Fuente: Elaboración propia).

A continuación, en la figura 7.3 se muestra el prototipo implementado el cual consta de todos los elementos expuestos en el diseño mecánico y electrónico del sistema, y posee un peso de 7.4 kg, aproximadamente.



Figura 7.3: Prototipo del sistema de adquisición de imágenes submarinas (Fuente: Elaboración propia).

Las pruebas iniciales se realizaron en una piscina (ambiente controlado) de 1.5 m de profundidad lo cual permitió validar el funcionamiento del subsistema focal y el aislamiento de los componentes al entorno acuático. Las pruebas se realizaron mediante el control por una persona y un BlueROV2 (ver figura 7.4).



Figura 7.4: Uso del prototipo por el usuario (izquierda) y por un ROV (derecha)
(Fuente: Elaboración propia).

Cabe resaltar que se utilizó un cubo de Rubik y una maceta para probar la generación del modelo digital por medio del software Agisoft Metashape. Además, se utilizó una cuadrícula para facilitar el emparejamiento de las características en las diferentes imágenes.

Posteriormente, se realizaron las pruebas en campo en Los Órganos, Piura. En la figura 7.5, se puede visualizar su operación en campo (litoral peruano).

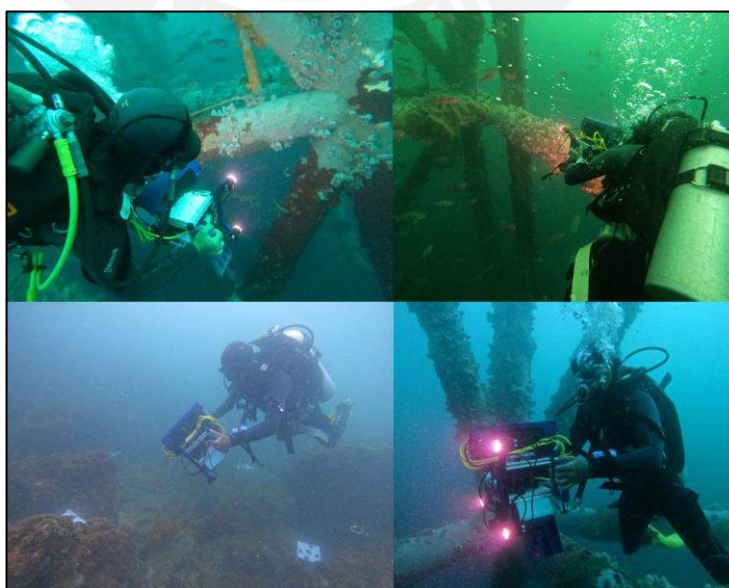


Figura 7.5: Pruebas en campo del sistema (Fuente: Elaboración propia).

7.2 Pruebas del sistema mecánico en el entorno acuático

Los resultados de las pruebas mostraron que el sistema mecánico es capaz de aislar los componentes electrónicos del ambiente acuático. En particular, se comprobó que los posibles ingresos de agua pueden ser producto del mal ajuste de los *penetrators* en los diferentes *enclosures*. Esto debido a que los O-Rings pueden encontrarse mal posicionados e impedir su deformación. En la figura 7.6, se muestra el sistema en el entorno acuático.

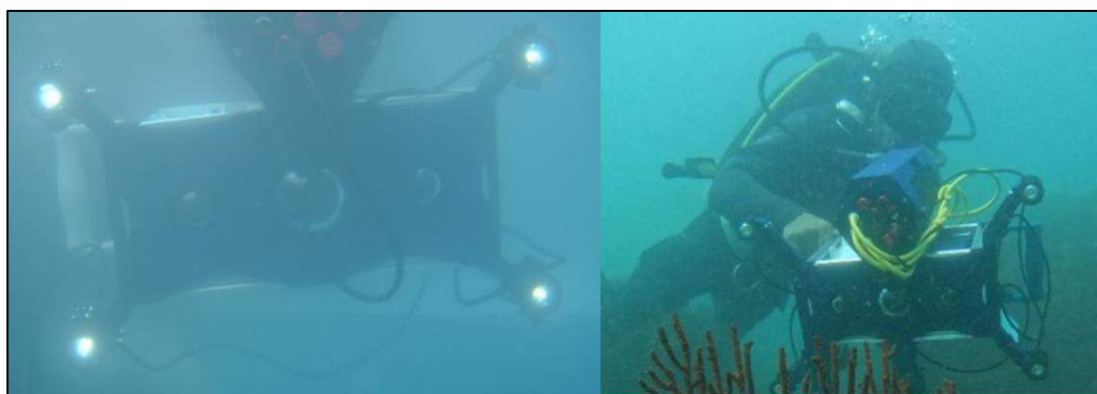


Figura 7.6: Prototipo del sistema en el entorno acuático (Fuente: Elaboración propia).

Finalmente, el sistema presenta flotabilidad positiva moderada lo cual requeriría que, durante su modo de uso por buzo, este se encuentre enganchado a al sistema.

7.3 Pruebas de la operación del sistema

En esta sección, se presentarán los resultados obtenidos de las pruebas del prototipo del sistema de adquisición de imágenes, los cuales conciernen el desempeño del subsistema de iluminación y focal. Adicionalmente, se muestran los resultados concernientes al tiempo de operación del sistema.

7.3.1 Desempeño en la adquisición de imágenes

En las figuras 7.7 y 7.8 se muestran un grupo de imágenes, tomadas por las cámaras del sistema, de los objetos ubicados en el centro de la malla descrita en las pruebas en ambiente controlado. Debido a que la cámara central es del tipo *rolling shutter*, la toma de imágenes es sensible al movimiento de la cámara. Por ello, se deben realizar movimientos suaves y continuos durante la manipulación del sistema. Por otra parte,

se observa que las imágenes tienden a mostrar un tono azulado producto del entorno acuático.



Figura 7.7: Imágenes adquiridas en las pruebas en entorno controlado (Fuente: Elaboración propia).

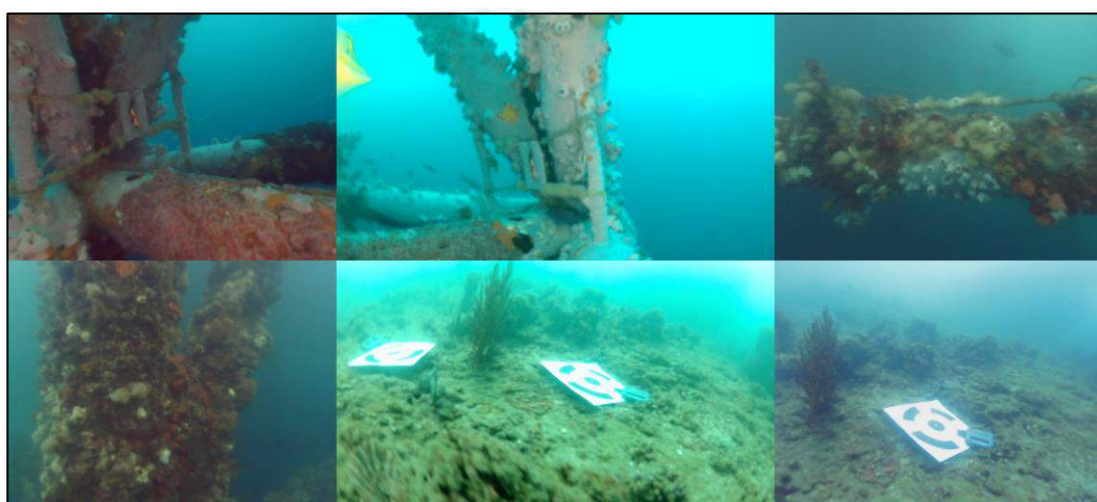


Figura 7.8: Imágenes adquiridas en las pruebas en campo (Fuente: Elaboración propia).

Por otra parte, se puede observar la presencia de partículas lo cual podría dificultar la generación de los recorridos virtuales. No obstante, en los entornos reales también se presentan este tipo de turbulencias y partículas flotantes; por ello, los resultados de las pruebas muestran mayor acercamiento a los esperados en un ambiente submarino de las costas peruanas.

7.3.2 Tiempo de operación del sistema

Se realizaron dos pruebas para determinar el tiempo de operación del sistema cuando solamente el computador Jetson Nano adquiere imágenes de las tres cámaras y añadiéndole el consumo de las luces submarinas a su máxima luminosidad. La batería se cargó hasta un voltaje de 12.3 V y se midió el voltaje de la batería aproximadamente cada 10 min. Cabe resaltar que no se consideró el consumo de los elementos

electrónicos adicionales. En la figura 7.9, se muestra el ajuste de la gráfica del voltaje de la batería en cada instante de tiempo.

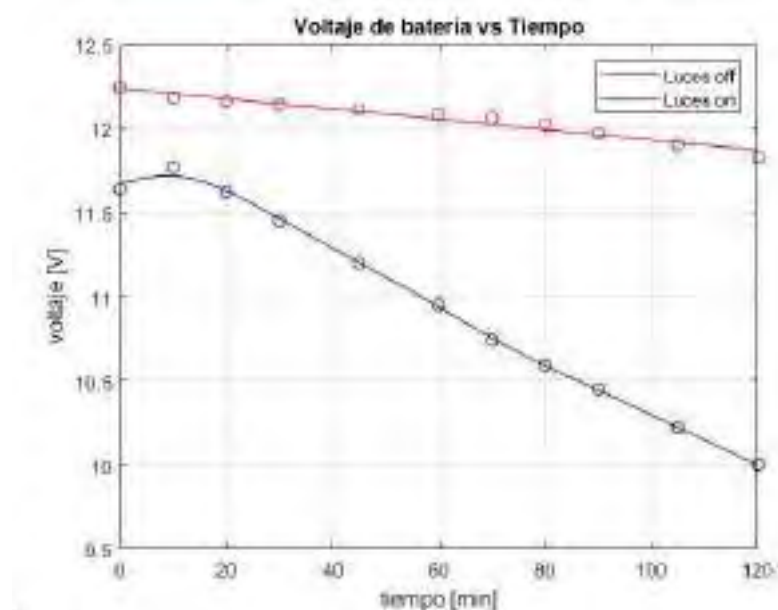


Figura 7.9: Gráfica del voltaje de la batería en el tiempo (Fuente: Elaboración propia).

Como se puede observar, el voltaje de la batería posee un decaimiento lineal durante la operación de los componentes de sistema electrónico que poseen mayor consumo de potencia. Por otra parte, esta batería es capaz de alimentar a estos componentes durante un periodo mayor de dos horas en las pruebas en ambientes controlados y en campo.

7.3.3 Resultados del control de iluminación adaptativo

Las pruebas se realizaron en ambientes en superficie y en entornos acuáticos controlados. Para cada prueba, se registraron la variación de la señal de control y el error resultante de la comparación con la imagen ecualizada. La señal de control representa el porcentaje de intensidad luminosa proporcionada por las luces submarinas (máx. 6000 lum en total). Se seleccionan los parámetros del factor de corrección $n = 1$, ya que las oscilaciones se efectuaban en cada muestreo cada periodo de muestreo, y $\beta = 1$, valor empírico que mostró mejores resultados para la naturaleza de las pruebas ya que logró reducir significativamente las oscilaciones. Para las pruebas en ambientes controlados se utilizó $\eta = 1$, que permite al controlador traducir completamente la información de la imagen debido a que no se requiere de una

amplificación de intensidad adicional gracias a la característica *low-light* de la cámara principal.

En la primera prueba realizada en superficie. Se utilizó el control proporcional para obtener la señal de control y el error correspondiente, ambas señales se muestran en la figura 7.10. Antes de las pruebas principales, se realizaron pruebas previas en una zona sin luz y, dado que la cámara necesita iluminación para detectar un mínimo de características, el proceso de ecualización y detección de características fue imposible. Los valores obtenidos de la señal de control eran inferiores al 3.0% y las luces no proporcionaban iluminación suficiente. Por lo tanto, si se detecta la ausencia total de luz, el algoritmo activa una señal de excitación que aumenta proporcionalmente la señal de control hasta que se supera el umbral y se detecta un número mínimo de características. Esta señal de excitación simula la componente que varía con la profundidad y afecta a la señal de control.

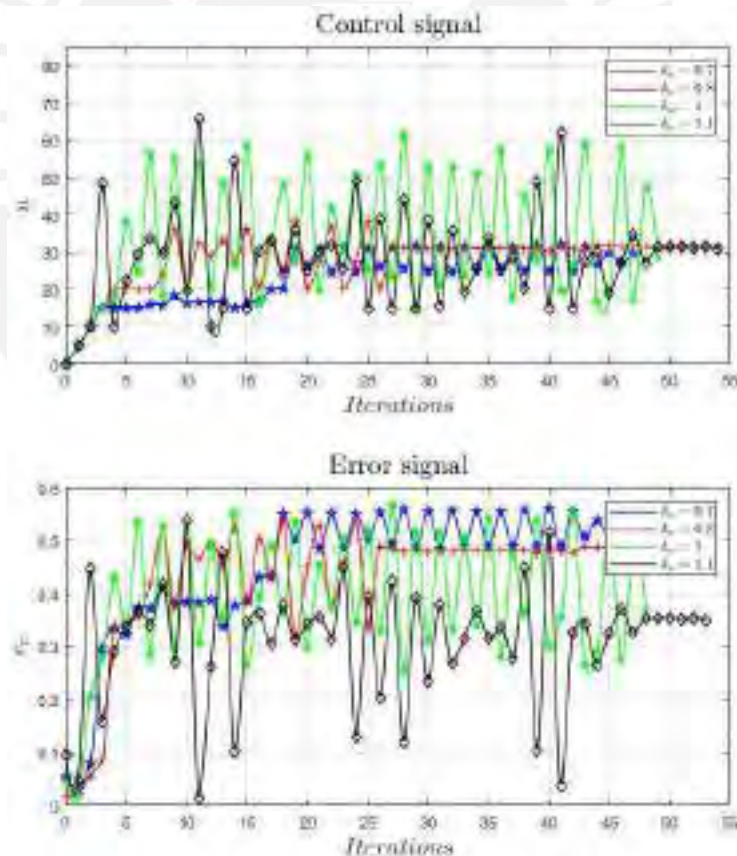


Figura 7.10: Resultados de pruebas en superficie – Controlador P (Fuente: Elaboración propia).

La mejor respuesta obtenida cuando $k_p = 0.8$ (mínima oscilación y mínimo tiempo de establecimiento). Además, como se ha mencionado, cualquier respuesta es propensa a presentar un error constante y oscilaciones periódicas a lo largo del tiempo. En particular, existe una tendencia a la inestabilidad con el aumento de la constante proporcional, que se refleja en el aumento de los valores pico y del tiempo de establecimiento. La señal de iluminación de control en estado estacionario obtenida es del orden de $u = 31.3\%$, la imagen sensada se muestra en la figura 7.11. Se ha observado que la imagen presenta cierta saturación en su iluminación, lo cual no es apropiado para aplicaciones posteriores. Por otro lado, las señales de control tienden a converger hacia el mismo valor mostrando que optimiza la iluminación de la imagen sensada, lo que resulta en una tendencia del error remanente hacia el valor medio de las oscilaciones de estado estacionario.



Figura 7.11: Imagen con iluminación óptima en superficie – Controlador P
(Fuente: Elaboración propia).

Con estos parámetros, a través del método de Ziegler-Nichols y considerando un periodo de dos iteraciones, se calcula el valor de $k_i = 0.5$ que se utilizará en la siguiente prueba.

La segunda prueba se ha realizado utilizando $k_p = 0.8$ y variando el parámetro integral k_i entre valores próximos al recomendado por el método de Ziegler-Nichols. Las respuestas del control y de la señal de error se muestran en la figura 7.12.

La mejor respuesta se obtuvo cuando $k_i = 0.6$ y los valores medios asintóticos de las señales de control en estado estacionario tienden a $15,3\%$. La mejor imagen se muestra en la Figura 7.13 y revela que la saturación ha desaparecido, dando lugar a colores y características mejor definidos. En este sentido, la componente integral modificada

permite reducir la saturación y adicionalmente muestra una mejora en el tiempo de respuesta ya que converge en 10 iteraciones frente a las 25 iteraciones de la primera prueba.

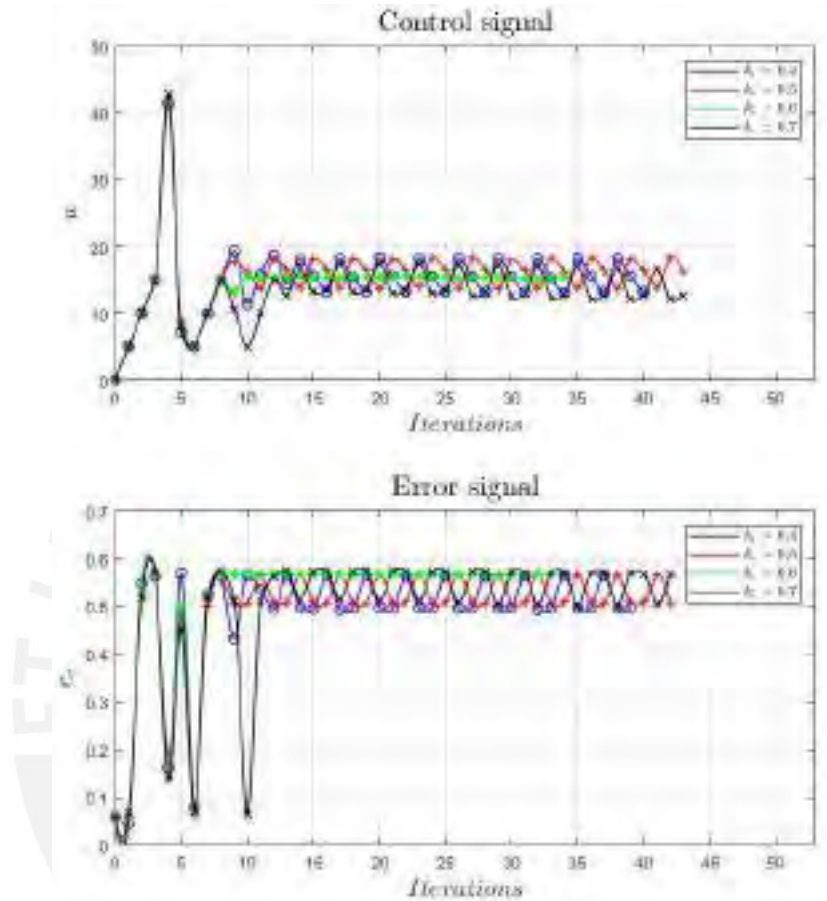


Figura 7.12: Resultados de pruebas en superficie – Controlador PI (Fuente: Elaboración propia).



Figura 7.13: Imagen con iluminación óptima en superficie – Controlador PI (Fuente: Elaboración propia).

La figura 7.14 muestra las señales de control y error de las pruebas submarinas (en una piscina) en las que se utilizó el control proporcional. En estas pruebas, la señal de control no fue estable, ya que se registraron oscilaciones continuas. Sin embargo, se observó que la señal de control media se aproximaba a las resultantes de las otras pruebas. Utilizando $k_p = 0.6$ se obtuvo la respuesta con menos oscilaciones. No obstante, la respuesta es igual a la iluminación mínima de excitación que se estableció como valor mínimo de control en los ensayos bajo el agua para mantener el sistema "activo" y evitar la pérdida de características de la imagen. En este sentido, el valor de la señal de control esperada es incluso inferior a la señal mínima de excitación. Entonces, para evitar la saturación de la señal de control a un valor mínimo, se utiliza $k_p = 0.8$ en el controlador proporcional-integral en las pruebas en piscina (entorno controlado).

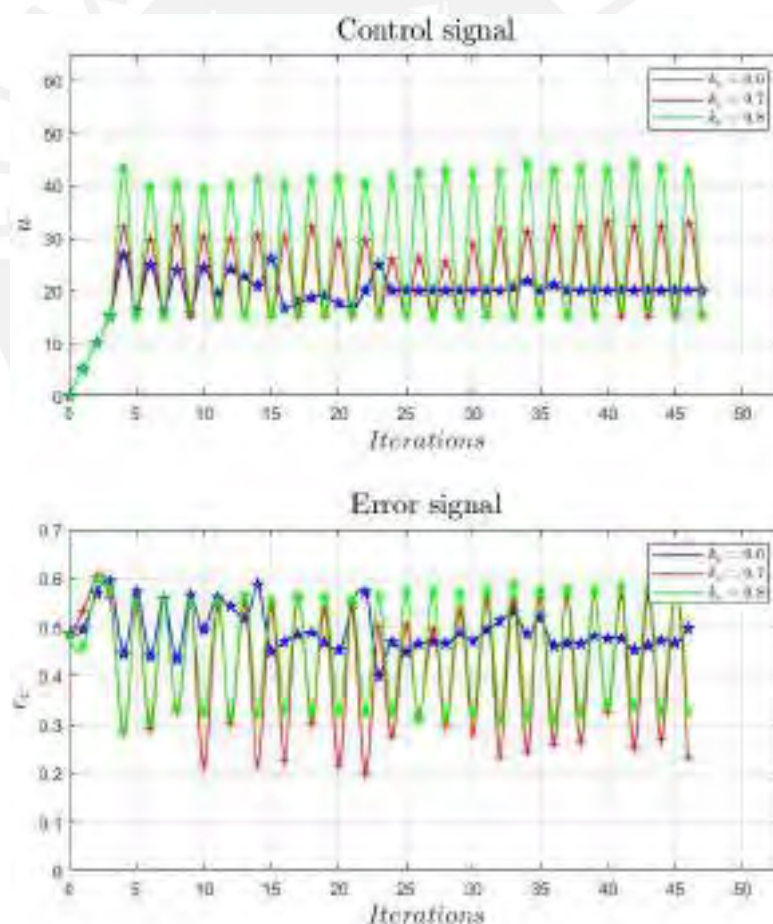


Figura 7.14: Resultados de pruebas subacuáticas – Controlador P (Fuente: Elaboración propia).

La mejor imagen obtenida en esta serie de pruebas se muestra en la figura 7.15.



Figura 7.15: Imagen con iluminación óptima en piscina – Controlador P (Fuente: Elaboración propia).

En la figura 7.16, se muestran las gráficas de las últimas pruebas subacuáticas con el controlador proporcional-integral.

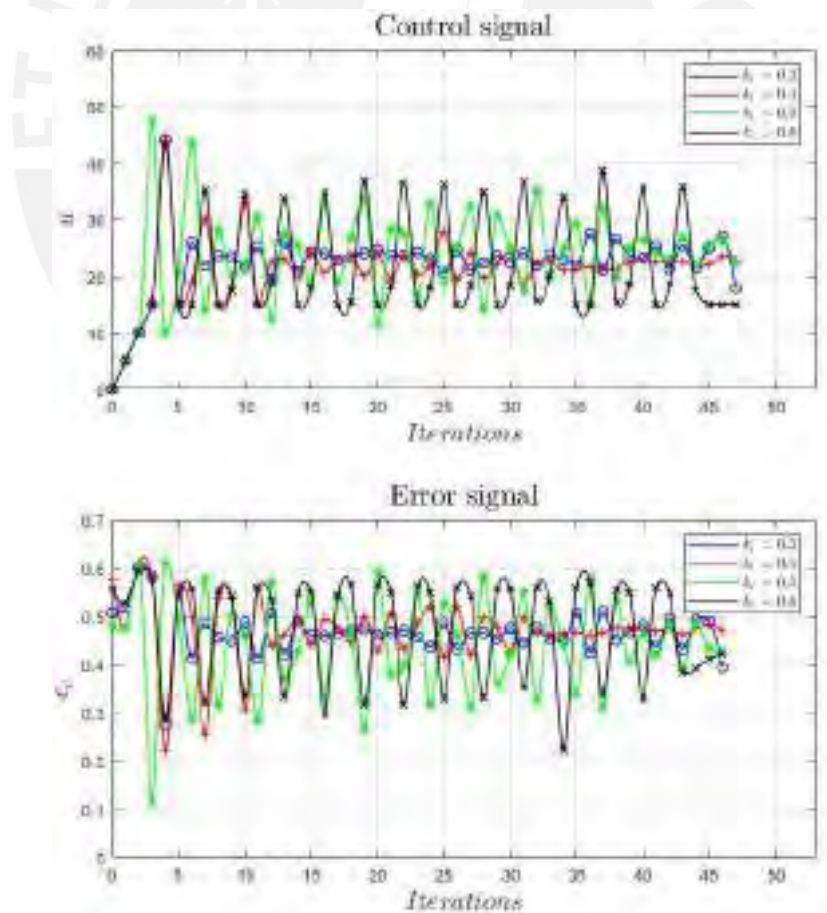


Figura 7.16: Resultados de pruebas subacuáticas – Controlador PI (Fuente: Elaboración propia).

Se consideraron valores de k_i próximos al obtenido con el método de Ziegler-Nichols. Se obtuvieron dos respuestas convergentes utilizando $k_i = 0.3$ y $k_i = 0.4$ que difieren de su estabilidad en estado estacionario. En primer lugar, para el primer valor, se muestra una respuesta rápida, pero con baja estabilidad, ya que no permite mantener la señal de control ante pequeñas perturbaciones generadas a partir de la iteración 35. Estas perturbaciones pueden incluir ligeros movimientos de la cámara, aparición de partículas y pequeños cambios en la iluminación. Por otro lado, para $k_i = 0.4$ se muestra un tiempo de asentamiento prolongado, pero con mayor robustez frente a las perturbaciones generadas. En general, los valores medios asintóticos de las señales de control tienden a un valor similar, en este caso aproximándose al 22,5% y la imagen con iluminación óptima se muestra en la Figura 7.17. Esta imagen presenta adecuada descripción de los bordes del objeto, lo que mejora la alineación y la generación de nubes densas. Además, los tonos de color de la imagen contribuyen a obtener un acabado texturizado y, por ende, visualmente más atractivo.



Figura 7.17: Imagen con iluminación óptima en piscina – Controlador PI
(Fuente: Elaboración propia).

CAPÍTULO 8

ANÁLISIS DE COSTOS

En este capítulo se presentarán los costos involucrados en la implementación del sistema de adquisición de imágenes submarinas. Las cotizaciones se muestran en el Anexo E. Por otra parte, como se mencionó, el prototipo estará enfocado en su operación hasta una profundidad mínima de 60 m, por lo que se considera que los costos de importación es el 50% del precio de los componentes adicionales para el diseño de operación máxima de 750 m. En las tablas mostradas en los posteriores incisos se resaltan de color amarillo los componentes adicionales que componen la versión de 750 m. Finalmente, el tipo de cambio estándar es 1 USD = 3.68 PEN.

8.1 Costo de componentes mecánicos y electrónicos

En la tabla 8.1 se muestran los costos involucrados en materias primas e insumos. Cabe resaltar que los elementos que se encuentran en el mercado local no poseen costo por su importación. Así, la barra plana de 150 x 150 x 120 será utilizada para la manufactura de los sellos laterales y la barra de dimensiones 200 × 150 × 30 será utilizada para la fabricación de los acoples universales. Se considera que el material necesario para la impresión de los diversos componentes es dos veces el requerido. En la sección 8.2, se presenta el cálculo respectivo para determinar el material necesario. Cabe mencionar que las barras serán utilizadas para la manufactura de los sellos laterales.

Tabla 8.1: Costo de materias primas e insumos (Fuente: Elaboración propia).

Materia prima / Insumo	Material	Cantidad	Precio unitario (USD)	Precio unitario (PEN)	Costo de importación (PEN)	Subtotal (PEN)
Grasa para O-Rings	Grasa de silicona	5	3.00	11.04	248.56	303.76
Rollo de filamento para impresión	Compuesto PLA-CFRP	8	-	125.00	-	1000.00
Epoxy marino Loctite	Epoxy	6	8.00	29.44	14.72	191.36
Barra plana de 150 × 150 × 120 (L × W × H)	Aluminio 6061-T6	1	20.00	73.60	36.80	110.40
Barra plana de 100 × 150 × 30 (L × W × H)	Aluminio 6061-T6	1	20.00	73.60	36.80	110.40
Costo de materias primas e insumos del prototipo (PEN)						1495.12
Costo total de materias primas e insumos (PEN)						1715.92

En la tabla 8.2, se muestra el costo de los componentes mecánicos requeridos.

Tabla 8.2: Costo de componentes mecánicos (Fuente: Elaboración propia).

Tipo de Componente	Denominación	Cantidad	Precio unitario (USD)	Precio unitario (PEN)	Costo de importación (PEN)	Subtotal (PEN)
Enc. secundario lateral	Watertight Enclosure 2" - 50 mm	2	119.00	437.92	248.56	1124.40
Enc. secundario central	Watertight Enclosure 3"	1	209.00	769.12	248.56	1017.68
Enc. secundario central	Watertight Enclosure 4"	1	278.00	1023.04	248.56	1271.60
Penetrator para comunicación	Potted Cable Penetrator (8 mm)	6	5.00	18.40	248.56	358.96
Válvula de liberación	Enclosure Vent and Plug	4	9.00	33.12	248.56	381.04
Penetrator cerrado	Penetrator Blank	2	4.00	14.72	248.56	278.00
Perfiles de la estructura	V-SLOT 2020	1	-	90.00	-	90.00
Conector en esquina a 90°	-	16	-	2.50	-	40.00
Conector cubo de 3 vías	-	8	-	15.00	-	120.00
Tornillos y tuercas	-	1	-	235.72	-	235.72
O-Rings	232 / 239	6	19.39	71.36	35.68	463.81
Conexión con luces	WetLink Penetrator (9.5 mm)	4	16.00	58.88	29.44	264.96
Conexión con ROV	DBH13M – Cobre	1	4.00	14.72	7.36	22.08
Costo total de componentes mecánicos del prototipo (PEN)						4917.40
Costo total de componentes mecánicos (PEN)						5403.29

En la tabla 8.3, se muestra el costo de los componentes electrónicos.

Tabla 8.3: Costo de componentes electrónicos (Fuente: Elaboración propia).

Tipo del componente	Denominación	Cantidad	Precio unitario (USD)	Precio unitario (PEN)	Costo de importación (PEN)	Subtotal (PEN)
Barómetro	Bar30	1	72.00	264.96	248.56	513.52
IMU	BNO055	1	34.95	128.62	64.31	192.92
Cámara secundaria	Low-light HD USB camera	2	99.00	364.32	248.56	977.20
Cámara principal	e-CAM82_USB	1	129.00	474.72	237.36	712.08
Luces Submarinas	Lumen Subsea light (Pre-connected set)	1	400.00	1472.00	248.56	1720.56
Sensor de ingreso de agua	Leak sensor	1	29.00	106.72	248.56	355.28
Switch submarino	Underwater switch	4	15.00	55.20	248.56	469.36
Indicador submarino	Subsea LED Indicator	3	13.00	47.84	248.56	392.08
Computador	Jetson Nano	1	179.95	662.22	331.11	993.32
Microcontrolador	Blue Pill	1	-	20.00	-	20.00
Pantalla	ILI9341	1	-	70.00	-	70.00
Regulador de voltaje	XL4015	1	-	15.00	-	15.00
Cable submarino (2 m)	Fathom ROV Tether	4	10.00	36.80	248.56	395.76
Relé	Módulo relé 5V a 1 canal	1	-	5.00	-	5.00
Batería	12.6V - 3S	1	-	290.30	-	290.30
Componentes adicionales	-	1	-	500.00	-	500.00
Barómetro	Bar100	1	259.00	953.12	476.56	1429.68
Luces Submarinas	OTI-UWL-401	4	561.33	2065.69	1032.85	9295.62
Conector de Luces	RMG-3-FS	4	30.45	112.06	56.03	504.25
Costo de componentes electrónicos del prototipo (PEN)						7622.39
Costo total de componentes electrónicos (PEN)						18851.94

Cabe resaltar que, para su operación hasta una profundidad de 750 m, es requerido intercambiar el barómetro y las luces submarinas por sus respectivos indicados en las casillas amarillas.

8.2 Costo de fabricación

En la tabla 8.4, se muestran los costos involucrados y el cálculo de la longitud del filamento total para la impresión en 3D de los componentes. Por otra parte, se considera que el costo de por hora de impresión 3D es 4 PEN/h. La longitud del filamento y tiempo de impresión han sido obtenidos del *software* Ultimaker CURA.

Tabla 8.4: Costo de fabricación por manufactura aditiva (Fuente: Elaboración propia).

Pieza	Código del plano	Filamento por unidad (m)	Horas estimadas (h)	Cantidad	Filamento por subtotal (m)	Subtotal (PEN)
Sop. de cámara lateral	G1-D01-A4	12.65	6.06	2	25.30	48.44
Sop. de cámara central	G2-D01-A3	59.28	23.53	1	59.28	94.14
Seguidor de cámara central	G2-D02-A4	3.27	1.80	1	3.27	7.21
Sop. delantero de bandeja	G3-D01-A4	8.78	3.01	1	8.78	12.04
Sop. trasero de bandeja	G3-D02-A3	20.87	6.81	1	20.87	27.24
Unión paralela	G3-D03-A4	4.80	1.73	2	9.60	13.86
Sujetador de Batería	G3-D04-A4	8.15	2.85	1	8.15	11.40
Bandeja de componentes	G3-D05-A3	86.83	28.72	1	86.83	114.89
Sujetador de luces	G4-D01-A3	15.16	5.84	2	30.32	46.72
Sop. enclosure secundario lateral	G4-D02-A4	7.88	2.84	4	31.52	45.37
Sop. enclosure secundario central	G4-D03-A4	13.78	4.43	2	27.56	35.42
Base de soporte derecha	G4-D04-A3	32.77	10.36	2	65.54	82.90
Base de soporte izquierda	G4-D05-A3	32.77	10.36	2	65.54	82.91
Sop. inferior de EP	G4-D06-A4	36.10	11.90	2	72.20	95.18
Sop. Sup. delantero de EP	G4-D07-A3	74.08	23.53	1	74.08	94.13
Sop. Sup trasero de EP	G4-D08-A3	80.05	25.32	1	80.05	101.28
Sujetador manual	G4-D09-A3	59.47	18.01	2	118.94	144.04
Cubierta delantera	G4-D10-A4	45.34	13.52	1	45.34	54.10
Cubierta lateral	G4-D11-A4	45.50	12.91	2	91.00	103.28
Sujetador de luces	G5-D01-A4	52.60	19.00	2	105.20	152.02
Comp. Sujetador de luces	G5-D02-A4	9.87	3.62	4	39.48	57.97
Sop. Sup. delantero de EP	G5-D03-A3	73.64	23.23	1	73.64	92.94
Sop. Sup trasero de EP	G5-D04-A3	69.55	22.20	1	69.55	88.80
Prototipo: Filamento total (m) Costo total de impresión (PEN)					924.17	1214.55
Total: Filamento total (m) Costo total de impresión (PEN)					1212.04	1606.28

Es requerido 1212.04 m de filamento, considerando que un rollo de 1 kg posee 300 m de filamento, es requerido cuatro rollos por lo que se adquirirá el doble (ocho rollos). En la tabla 8.5, se muestra la estimación de costos de fabricación del sistema. El

cálculo considera que el costo de la manufactura de los sellos laterales es el doble del costo de las tapas proporcionadas por la empresa BlueRobotics.

Tabla 8.5: Estimación de costos de fabricación (Fuente: Elaboración propia).

Pieza	Código del plano	Cantidad	Procesos	Precio unitario (PEN)	Subtotal (PEN)
Perfiles de estructura	G4-E01-A3	16	Corte por sierra	2.00	32.00
PCB y <i>shield</i>	-	1	-	158.80	158.80
Sello lateral de 3 pulg para penetrators	G2-D03-A3	1	Torneado, fresado, taladrado y roscado	300.00	300.00
Sello lateral de 4 pulg cerrado	G3-D06-A3	1	Torneado y fresado	360.00	360.00
Sello lateral de 4 pulg para penetrators	G3-D07-A3	1	Torneado, fresado, taladrado y roscado	450.00	450.00
Acople Universal	G5-D05-A4	2	Fresado	90.00	180.00
Costo total de fabricación del prototipo (PEN)					190.80
Costo total de fabricación (PEN)					1480.80

8.3 Costo de diseño

En la tabla 8.6, se muestran los costos de diseño del sistema de adquisición de imágenes, considerado como honorarios 12 PEN/h.

Tabla 8.6: Costo de diseño (Fuente: Elaboración propia).

Actividad	Horas estimadas (h)	Subtotal (PEN)
Diseño conceptual	100.00	1200.00
Diseño mecánico	100.00	1200.00
Diseño electrónico	100.00	1200.00
Diseño de algoritmos	150.00	1800.00
Pruebas y documentación	50.00	600.00
Costo total de diseño (PEN)		6000.00

8.4 Costo de implementación y pruebas

A continuación, se presentan los costos de ensamble en la tabla 8.7, considerando un costo por hora de 12 PEN/h.

Tabla 8.7: Costo de ensamble (Fuente: Elaboración propia).

Ensamble	Código del plano	Cantidad	Horas estimadas (h)	Subtotal (PEN)
Enclosure secundario lateral	G1-E01-A2	2.00	1.00	24.00
Enclosure secundario central	G2-E01/E02-A1	1.00	1.00	12.00
Subensamble de bandeja	G3-E01/E03-A2	1.00	2.00	24.00
Enclosure principal	G3-E02/E04-A2	1.00	1.50	18.00
Estructura de soporte	G4-E01-A3	1.00	2.00	24.00
Ensamble general	G0-E01/E02-A0	1.00	5.00	60.00
PCB y <i>shield</i>	E1-01/02-A4	1.00	2.50	30.00
Costo total de ensamble				192.00

Por otra parte, los costos de las pruebas de funcionamiento se presentan en la tabla 8.8, para lo cual se considera que el sistema se encuentra armado.

Tabla 8.8: Costo de pruebas (Fuente: Elaboración propia).

Concepto	Horas estimadas (h)	Costo por hora (PEN/h)	Subtotal (PEN)
Traslado a zona de operación	16.00	20.00	320.00
Pruebas de funcionamiento en superficie	0.50	14.00	7.00
Entrenamiento del operario para el uso del sistema	0.50	15.00	7.50
Pruebas del sistema en el entorno submarino	0.50	15.00	7.50
Verificación de resultados	0.50	12.00	6.00
Costo total de pruebas			348.00

8.5 Costo total

En las tablas 8.9, se muestran los costos involucrados para la implementación del prototipo del sistema y el diseño para una operación de 750 m. Se observa que el costo del prototipo es 21980.26 PEN (5972.90 USD) y el costo del sistema para su operación hasta una profundidad de 750 m es 35598.23 PEN (9673.44 USD).

Tabla 8.9: Costo total del prototipo y del sistema (Fuente: Elaboración propia).

Concepto	Subtotal prototipo (PEN)	Subtotal sistema (PEN)
Materias primas e insumos	1495.12	1715.92
Componentes mecánicos	4917.40	5403.29
Componentes electrónicos	7622.39	18851.94
Fabricación de piezas	190.80	1480.80
Fabricación por impresión 3D	1214.55	1606.28
Ensamble	192.00	192.00
Diseño	6000.00	6000.00
Pruebas	348.00	348.00
Costo total (PEN)	21980.26	35598.23

CONCLUSIONES

- A través de la investigación de sistemas relacionados, se observó que la mayoría de las tecnologías actuales utilizan un lente de tipo domo. Por otra parte, utilizan aluminio y titanio en su diseño mecánico. Así, los sistemas enfocados a su uso por buzo pueden trabajar hasta una profundidad de 50 – 60 m.
- A través de la metodología descrita, se logró diseñar un sistema de adquisición de imágenes submarinas de tres cámaras de bajo costo, el cual es capaz de ser operado por un ROV o buzo profesional. Esta característica dota de versatilidad al sistema, lo cual es una ventaja ante otros sistemas relacionados.
- Se logró diseñar la estructura mecánica del sistema, la cual permite una sumersión máxima de 750 m (7.60 MPa) para su modo uso por ROV, y hasta 300 m para su modo de uso por buzo. En el desarrollo de esta última configuración se consideró la minimización de sus dimensiones ($0.45 \times 0.35 \times 0.33$ m) para reducir su peso total y desarrollar un sistema compacto (hasta 7.4 kg en el prototipo).
- Se realizó el diseño electrónico del sistema incluyendo la selección de componentes comerciales para sus dos modos de uso. A su vez, este desarrollo involucró el diseño de circuitos de control para la desconexión de la fuente de alimentación cuando se detecte el ingreso de agua, basándose en el circuito *latch*.
- Se ha logrado diseñar y probar un algoritmo de control de iluminación adaptativo que permite regular la iluminación para optimizar el contraste de las imágenes. Los resultados muestran que la iluminación óptima ocurre cuando el error remanente es constante y mínimo. Los parámetros del controlador se sintonizaron para minimizar el número de iteraciones requeridas para estabilizar el error, considerando la naturaleza y respuesta de los equipos utilizados.
- Se logró validar el desempeño mecánico, electrónico y de control del sistema a través de la implementación de un prototipo en un ambiente controlado. En este sentido, las imágenes obtenidas muestran al canal azul como color predominante. A su vez, se comprobó que el sistema es capaz de operar por más de 120 minutos.
- El análisis de costos muestra como presupuesto final 9673.44 USD, menor al costo máximo planteado en los requerimientos del sistema (15000 USD). Por otra parte, el prototipo implementado para uso por buzo tiene un costo significativamente menor (5972.90 USD), considerándolo como una opción de mayor viabilidad.

RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- Mejorar la estimación de desplazamiento y/o posicionamiento del sistema al incluir el uso de algoritmos de visión por computadora con mayor complejidad como la odometría visual o mediante el uso de tecnologías más sofisticadas como USBL, SBL y LBL.
- Evaluar el efecto de la distancia base entre cámaras en la superposición de imágenes y su efecto en la reconstrucción de los modelos virtuales generados. En este sentido, se puede comparar los resultados obtenidos con diferentes configuraciones de cámaras: lineal horizontal, lineal vertical, triangular, cuadrado, etc.
- Implementar mayor número de sensores de imagen para captar mayor información y mejorar la generación de los recorridos virtuales. También es posible plantear el uso de sensores con mayor resolución, reduciendo su sensibilidad a la luz, e implementado luces submarinas con mayor potencia.
- Realizar pruebas con diferentes cámaras en el algoritmo de control con el fin de determinar los parámetros adecuados del controlador con cámaras con diferentes sensores, arquitecturas de funcionamiento y frecuencias de muestreo.
- Mejorar el algoritmo de control adaptativo incluyendo un sensor capaz de medir la distancia del sistema al plano de sensado e incluir la cantidad de refracción estimada como parámetro del algoritmo de control.
- Ampliar el algoritmo control adaptativo incluyendo un control independiente de cada emisor de luz submarino. Esto se logra al seccionar la imagen en un número igual a la cantidad de luces submarinas y controlar estos últimos de acuerdo a su influencia en cada grupo de la imagen.
- Aplicar modelos del aprendizaje profundo (como redes neuronales) para el control de iluminación utilizando como datos de entrada imágenes adquiridas de los entornos submarinos reales con y sin iluminación óptima.
- Completar el prototipo del sistema de adquisición de imágenes submarinas al fabricar y adquirir los componentes faltantes para su modo de uso por ROV. A su vez, realizar las pruebas correspondientes para validar su funcionamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Adreno. (2024). *Costs Involved with Scuba Diving*. <https://scubadiving.com.au/pages/scuba-diving-costs>
- Alcocer, A., Oliveira, P., & Pascoal, A. M. (2006). Underwater Acoustic Positioning Systems Based on Buoys With GPS. *European Conference on Underwater Acoustics (ECUA)*.
- Antonelli, G. (2004). Underwater Robots. En *Springer Tracts in Advanced Robotics: Vol. 7 STAR*.
- Aziz, E. S., Chassapis, C., Esche, S., Dai, S., Xu, S., & Jia, R. (2008). Online wind tunnel laboratory. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings, June*. <https://doi.org/10.18260/1-2--3402>
- BAIRD, J. (2011). *UNDERWATER ACQUISITION OF IMAGERY FOR 3D MAPPING ENVIRONMENTS*.
- Bannister, B. R., & Whitehead, D. G. (1987). Fundamentals of modern digital systems. En *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*.
- Baum, T., & Hai, N. T. T. (2020). Hospitality, tourism, human rights and the impact of COVID-19. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 32(7), 2397–2407. <https://doi.org/10.1108/IJCHM-03-2020-0242>
- Beck, J., Rainoldi, M., & Egger, R. (2019). Virtual reality in tourism: a state-of-the-art review. *Tourism Review*, 74(3), 586–612. <https://doi.org/10.1108/TR-03-2017-0049>
- Bott, R. (2014). The Pneumatic Handbook. En *Igarss 2014* (Número 1).
- CCOHS. (2021). *Hand Tool Ergonomics - Tool Design*. <https://www.ccohs.ca/oshanswers/ergonomics/handtools/tooldesign.html>
- COMEX. (s. f.). *ORUS 3D®*. <https://comex.fr/en/orus3d/>
- COMEX. (2016). *ORUS 3D*.
- COMUMA. (2015). *PLAN ESTRATEGICO PARA LA GESTION Y MANEJO DE LOS ECOSISTEMAS MARINO – COSTEROS Y SUS RECURSOS*. Ministerio del Ambiente. <https://www.minam.gob.pe/comuma/wp-content/uploads/sites/106/2015/07/Plan-Estrategico-documento-en-revision-junio2016.pdf>
- Congreso de la República. (2021). *Boletín Social N ° 30*. 1–53. http://www.congreso.gob.pe/Docs/Otamdegrl/files/boletinsocial/bs_30_julio_2020.pdf

- Dive&more. (2015). *How much weight do you really need?* <https://diveandmore.com/how-much-weight/>
- DIVENIN. (s. f.). *Deep Diving: Rules, Recommendations And Fun Facts.* <https://www.divein.com/articles/deep-diving/>
- Drap, P., Merad, D., Hijazi, B., Gaoua, L., Nawaf, M. M., Saccone, M., Chemisky, B., Seinturier, J., Sourisseau, J. C., Gambin, T., & Castro, F. (2015). Underwater photogrammetry and object modeling: A case study of xlendiwreck in malta. *Sensors (Switzerland)*, 15(12), 30351–30384. <https://doi.org/10.3390/s151229802>
- Drap, P., Seinturier, J., Hijazi, B., Merad, D., Boi, J. M., Chemisky, B., Seguin, E., & Long, L. (2015). The ROV 3D project: Deep-sea underwater survey using photogrammetry: Applications for underwater archaeology. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 8(4). <https://doi.org/10.1145/2757283>
- Earth Exploring our Fluid. (s. f.). *Light in the Ocean.* <https://manoa.hawaii.edu/exploringourfluidearth/physical/ocean-depths/light-ocean>
- El-Said, O., & Aziz, H. (2021). Virtual Tours a Means to an End: An Analysis of Virtual Tours' Role in Tourism Recovery Post COVID-19. *Journal of Travel Research*. <https://doi.org/10.1177/0047287521997567>
- Global Virtual Tour Market. (2024). Market.us. <https://market.us/report/virtual-tour-market/>
- Groves, P. D. (2008). Principles of GNSS , Inertial , and Multisensor Integrated. En *Technology*.
- Hibbeler, R. C. (2016). *Mechanic of Materials* (10^a ed., Vol. 148).
- IndustryARC. (s. f.). *Augmented Reality & Virtual Reality Market for Tourism Industry - Forecast(2021 - 2026).* <https://www.industryarc.com/Report/16351/augmented-reality-virtual-reality-market-for-tourism-industry.html>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2019). *Principales indicadores del sector turismo (Versión 15).* <https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/turismo-11176/>
- Jiang, R., Jáuregui, D. V., & White, K. R. (2008). Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: Literature review. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 41(8), 823–834. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2007.12.005>
- Kaufman, J., Rennie, A. E. W., & Clement, M. (2015). Single camera photogrammetry for

reverse engineering and fabrication of ancient and modern artifacts. *Procedia CIRP*, 36, 223–229. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.073>

Lecumberry, F. (s. f.). *Cálculo de disparidad en imágenes estéreo, una comparación.*

Liarokapis, F., Kouřil, P., Agrafiotis, P., Demesticha, S., Chmelík, J., & Skarlatos, D. (2017). 3D modelling and mapping for virtual exploration of underwater archaeology assets. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2W3), 425–431. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-425-2017>

Mandić, F., Rendulić, I., Mišković, N., & Na, D. (2016). Underwater Object Tracking Using Sonar and USBL Measurements. *Journal of Sensors*, 2016(i). <https://doi.org/10.1155/2016/8070286>

Menna, F., Nocerino, E., & Remondino, F. (2017). Flat versus hemispherical dome ports in underwater photogrammetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2W3), 481–487. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-481-2017>

Menna, Fabio, Nocerino, E., Fassi, F., & Remondino, F. (2016). Geometric and optic characterization of a hemispherical dome port for underwater photogrammetry. *Sensors (Switzerland)*, 16(1), 1–21. <https://doi.org/10.3390/s16010048>

Menna, Fabio, Nocerino, E., Nawaf, M. M., Seinturier, J., Torresani, A., Drap, P., Remondino, F., & Chemisky, B. (2019). *Towards real-time underwater photogrammetry for subsea metrology applications. June*, 1–10. <https://doi.org/10.1109/oceanse.2019.8867285>

Menna, Fabio, Nocerino, E., & Remondino, F. (2017). Optical aberrations in underwater photogrammetry with flat and hemispherical dome ports. *Videometrics, Range Imaging, and Applications XIV*, 10332(December), 1033205. <https://doi.org/10.1117/12.2270765>

Menna, Fabio, Nocerino, E., & Remondino, F. (2018). Photogrammetric Modelling of Submerged Structures: Influence of Underwater Environment and Lens Ports on Three-Dimensional (3D) Measurements. *Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modelling*, 279–303. <https://doi.org/10.3390/books978-3-03842-685-1-13>

Ministerio de Economía y Finanzas, Ministerio de Comercio Exterior y Turismo, & SNIP Perú. (2003). *Guía para la formulación de proyectos de inversión exitosos.* https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/docs/instrumentos_metod/turismo/Guia_de_turismo.pdf

- Moore, S. W., Bohm, H., & Jensen, V. (2010). *Underwater Robotics: Science, Design and Fabrication*.
- Nawaf, M. M., Merad, D., Royer, J. P., Boi, J. M., Saccone, M., Ellefi, M. Ben, & Drap, P. (2018). Fast visual odometry for a low-cost underwater embedded stereo system†. *Sensors (Switzerland)*, 18(7). <https://doi.org/10.3390/s18072313>
- NCD-RISK. (2017). *Body-mass index*. www.ncdrisc.org
- Neyer, F., Nocerino, E., & Grün, A. (2014). Image Quality Improvements in Low-Cost Underwater Photogrammetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010025751>
- Nistér, D., Naroditsky, O., & Bergen, J. (2004). Visual odometry. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2004.1315094>
- Oleari, F., Kallasi, F., Rizzini, D. L., Aleotti, J., & Caselli, S. (2015). An underwater stereo vision system: From design to deployment and dataset acquisition. *MTS/IEEE OCEANS 2015 - Genova: Discovering Sustainable Ocean Energy for a New World*, May. <https://doi.org/10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271529>
- Opderbecke, J. (1997). At-sea calibration of a USBL underwater vehicle positioning system. *Oceans Conference Record (IEEE)*, 1, 721–726. <https://doi.org/10.1109/oceans.1997.634455>
- Park, M., Examiner, P., & Selby, G. (2010). *IMAGE CAPTURING APPARATUS WITH CLARITY SENSOR, UNDERWATER IMAGE COMPENSATION AND UNDERWATER FLASH COMPENSATION*.
- Parker Seals. (2001). *Parker O-Ring Handbook*.
- Ross, C. T. F. (2006). A conceptual design of an underwater vehicle. *Ocean Engineering*, 33(16), 2087–2104. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2005.11.005>
- ROVCO. (2019). SubSLAM X2. <https://www.rovco.com/technology/subslam/>
- Salazar, N., Henrich, M., Larios, P., Reaño, M., Schofield, G. (2018). Diseño de un método para la determinación de las medidas antropométricas para ser usadas en el tallaje de la población peruana. *Ingeniería industrial*, 36, 67–83. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2018.n036.2447>

- Scuba Diving. (2019). *Your First Underwater Camera System: How to Build a Pro-Level Setup*. <https://www.scubadiving.com/how-to-build-a-pro-level-setup>
- SHAHRIAR, N., & FEZHMAN, F. (2005). *MULTI-CAMERA INSPECTION OF UNDERWATER STRUCTURES*.
- Škare, M., Soriano, D. R., & Porada-Rochoń, M. (2021). Impact of COVID-19 on the travel and tourism industry. *Technological Forecasting and Social Change*, 163(November 2020). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120469>
- SPOTX. (2019). *PRO SQUID 2*. <https://www.spotx.com.au/underwater-video-systems-and-rovs/drop-camera-live-underwater-gopro-video-to-tv-monitor-plotter-sounder-ps2>
- Tan, W., Anglea, T., & Wang, Y. (2019). Analysis of Dead Reckoning Accuracy in Swarm Robotics System. *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), 2018-July*, 860–864. <https://doi.org/10.1109/WCICA.2018.8630531>
- Thrun, S. (2002). *Probabilistic robotics* (Vol. 45, Número 3). <https://dl.acm.org/doi/10.1145/504729.504754>
- Timoshenko, S. (1974). Theory of plates and shells. En *Brain Research* (Vol. 67, Número 2).
- Tinoco, O. (2003). Los impactos del turismo en el en el Perú. *Industrial Data: Revista Data*, 6(1), 47–60. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81606106>
- Vickery, K. (1998). Acoustic positioning systems - a practical overview of current systems. *Proceedings of the IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, September 1998*, 5–17. <https://doi.org/10.1109/auv.1998.744434>
- Walsh. (s. f.). *Oceanografía Física*.
- Welch, G., & Bishop, G. (2001). An Introduction to the Kalman Filter. *SIGGRAPH 2001*.
- Wierzbicki, D. (2018). Multi-camera imaging system for UAV photogrammetry. *Sensors (Switzerland)*, 18(8). <https://doi.org/10.3390/s18082433>
- Wright, A. E., Conlin, D. L., & Shope, S. M. (2020). Assessing the accuracy of underwater photogrammetry for archaeology: A comparison of structure from motion photogrammetry and real time kinematic survey at the east key construction wreck. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 1–20. <https://doi.org/10.3390/jmse8110849>
- Zacchini, L., Bucci, A., Franchi, M., Costanzi, R., & Ridolfi, A. (2019). Mono visual odometry

for Autonomous Underwater Vehicles navigation. *OCEANS 2019 - Marseille, OCEANS Marseille 2019, 2019-June*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2019.8867286>

Zhang, M., Yang, J., Zhao, J., & Dai, Y. (2019). A Dead-Reckoning Based Local Positioning System for Intelligent Vehicles. *2019 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems, ICPICS 2019*, 513–517. <https://doi.org/10.1109/ICPICS47731.2019.8942565>



ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: Procedimiento para el diseño conceptual	131
A.1. Antecedentes al diseño	131
A.2. Marco teórico	134
A.3. Estado del arte – descripción detallada	145
A.4. Diseño conceptual – desarrollo	153
ANEXO B: Memoria de cálculo	185
B.1. Cálculo de las dimensiones de la estructura de soporte.	185
B.2. Cálculo de la fuerza de arrastre.	186
B.3. Cálculo de la resistencia de la estructura de soporte.	188
B.4. Cálculo del espesor de los <i>enclosures</i>	192
B.5. Cálculo del espesor necesario de los sellos laterales.	193
B.6. Cálculo de las dimensiones de los <i>O-Ring</i> de los sellos laterales.	195
B.7. Cálculo de la fuerza de arrastre en la cubierta delantera.	198
B.8. Cálculo de la superposición de imagen en función de la distancia entre sistema y el entorno submarino.	199
B.9. Verificación de cobertura total de luz del área de sensado y cálculo del rango máximo en función de luz disipada.	201
B.10. Cálculo del torque de ajuste de los tornillos de conexión.	204
B.11. Cálculo de la resistencia de los tornillos	208
B.12. Cálculo del torque de ajuste y verificación de resistencia de tornillos en acople universal con ROV	209
B.13. Cálculo y selección de componentes del circuito de protección ante ingreso de agua.	211
B.14. Cálculo y selección de componentes del circuito de sensado de voltaje.	217
ANEXO C: Códigos de programación	219
C.1. Algoritmo de registro de imágenes	219
C.2. Algoritmo de registro de datos del barómetro.	220
C.3. Algoritmo de control de iluminación – simplificado	221
C.4. Librería multiuso para el control del sistema	223
C.5. Algoritmo de generación de imagen para interfaz	230
C.6. Algoritmo de control del microcontrolador	231
ANEXO D: Datos técnicos de componentes electrónicos	237
D.1. Sensor de Presión (barómetro)	237
D.2. Unidad de medición inercial (IMU)	242

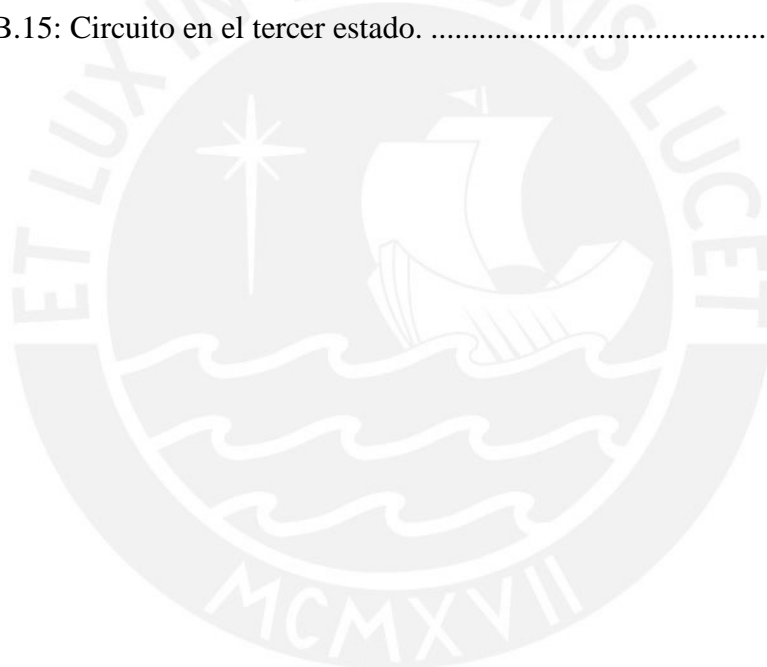
D.3.	Cámaras secundarias – laterales.....	248
D.4.	Cámara principal – central	251
D.5.	Luces submarinas	254
D.6.	Sensor de ingreso de agua	258
D.7.	Indicador submarino.....	259
D.8.	<i>Switch</i> submarino	260
D.9.	Computador – Jetson Nano	261
D.10.	Microcontrolador.....	262
D.11.	Pantalla para visualización.....	265
D.12.	Regulador de voltaje	268
D.13.	Fathom ROV Tether.....	271
D.14.	Módulo relé 1 canal 5V.....	272
D.15.	Celda LGMH1 de la batería 12.6V 3S	273
ANEXO E: Cotizaciones.....		274
E.1.	Compras BlueRobotics	274
E.2.	Perfiles, conectores, tuercas y tornillos.....	278
E.3.	Filamento para impresión.....	281
E.4.	Componentes electrónicos	282
E.5.	Costos adicionales para el modo de uso por ROV	285
ANEXO F: Planos mecánicos y electrónicos.....		289

ÍNDICE DE IMÁGENES

	Pág.
Figura A.1: Impacto en el PBI derivado de la caída del sector Turismo 2020.	132
Figura A.2: (a) Configuración del par de cámaras, (b) Relación geométrica para obtener la disparidad.	134
Figura A.3: Distorsión radial generada por el puerto plano.....	135
Figura A.4: Efecto del puerto tipo domo.	136
Figura A.5: Modelo original (izquierda) y nube de puntos generada mediante fotogrametría con cámara única (derecha).	137
Figura A.6: Distancia de adquisición versus disparidad en píxeles para tres diferentes distancias base entre cámaras.	138
Figura A.7: Filtro de Kalman.	139
Figura A.8: Principio de la navegación por estima.	139
Figura A.9: Ruta de la cámara estimada en 3D	140
Figura A.10: Sistema GIB (izquierda) y boyas utilizadas antes de su despliegue (derecha).	141
Figura A.11: Representación del <i>Long Baseline</i> LBL, <i>Short Baseline</i> SBL y <i>Ultra-Short Baseline</i> USBL.	142
Figura A.12: Estimación de la pérdida de color.....	144
Figura A.13: Profundidad – Porcentaje de decaimiento de la intensidad de luz	144
Figura A.14: (a) Sistema de 300 m, (b) sistema de 3000 m, (c) sistema de 6000 m, (d) sistema para uso de buzo.	146
Figura A.15: Módulo bifocal en operación.	146
Figura A.16: (a) SubSLAM X2, (b) conexión del módulo a un ROV submarino ..	147
Figura A.17: Pro Squid 2.	147
Figura A.18: Canon 1D× Mark II.	148
Figura A.19: Contenedor del sistema de control (izquierda) y Contenedores de las cámaras (derecha).	149
Figura A.20: Componentes del sistema electrónico de control y visión.....	149
Figura A.21: SeaArray operado por un buzo.	150

Figura A.22: Imágenes del sistema conectado al Rémora 2000 ROV (a) lista de las tres cámaras sincronizadas, (b) vista del subsistema de control encapsulado.....	151
Figura A.23: Esquemático del sistema de adquisición de imágenes y su conexión con el ROV.....	152
Figura A.24: Dominio de comunicación.....	157
Figura A.25: Dominio de interfaz.....	157
Figura A.26: Dominio de sensores.....	158
Figura A.27: Dominio de procesamiento y control.....	159
Figura A.28: Dominio de energía.....	159
Figura A.29: Dominio de actuadores.....	160
Figura A.30: Dominio de almacenamiento.....	160
Figura A.31: Dominio mecánico.....	161
Figura A.32: Concepto de solución 1.....	171
Figura A.33: Distribución de componentes del concepto de solución 1.....	172
Figura A.34: Conexión entre ROV y sistema para el concepto de solución 1.....	173
Figura A.35: Concepto de solución 2.....	174
Figura A.36: Distribución de componentes del concepto de solución 2.....	175
Figura A.37: Conexión entre ROV y sistema para el concepto de solución 2.....	176
Figura A.38: Concepto de solución 3.....	177
Figura A.39: Distribución de componentes del concepto de solución 3.....	177
Figura A.40: Conexión entre ROV y sistema para el concepto de solución 3.....	178
Figura A.41: Gráfica de los resultados por la evaluación técnico-económica.....	183
Figura A.42: Diagrama de operaciones en modo de uso por buzo.....	184
Figura A.43: Diagrama de operaciones en modo de uso por ROV.....	184
Figura B.1: Dimensiones de la estructura de soporte.....	185
Figura B.2: Coeficiente de arrastre de acuerdo al número de Reynolds.....	187
Figura B.3: Configuración del caso 1.....	188
Figura B.4: Diagrama de momento flector del caso 1.....	189
Figura B.5: Sección de análisis.....	190

Figura B.6: Configuración del caso 2.	191
Figura B.7: Dimensiones de interés en el contacto entre sello lateral y contenedor cilíndrico.....	195
Figura B.8: Reducción del diámetro vs stretch del O-Ring.	197
Figura B.9: Superposición entre cámara principal y secundaria.....	199
Figura B.10: Área de cobertura mínima de luz.	201
Figura B.11: Casos posibles en la configuración UTT.	205
Figura B.12: Cargas en las uniones atornilladas entre acople y sistema.....	209
Figura B.13: Circuito de aislamiento.	211
Figura B.14: Circuito en el segundo estado.	212
Figura B.15: Circuito en el tercer estado.	214



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla A.1: Comparativa entre soluciones para estimación de posición.....	143
Tabla A.2: Evaluación técnica de los conceptos de solución.....	182
Tabla A.3: Evaluación económica de los conceptos de solución.....	182
Tabla F.1: Lista de planos mecánicos.	289
Tabla F.2: Lista de planos electrónicos.....	290



ANEXO A: Procedimiento para el diseño conceptual

A.1. Antecedentes al diseño

A continuación, se presentará la justificación del uso de recorridos virtuales para abordar la problemática propuesta y el detalle de la metodología a utilizar.

A.1.1 Problemática – justificación

Según Beck, el uso de ambientes virtuales posee aplicaciones en diversas áreas del turismo, incluidos planeamiento y gestión, marketing e intercambio de información, entretenimiento y educación (Beck et al., 2019). Además, el uso de estas tecnologías posee ventajas como:

- Conocer el patrimonio turístico previo a una visita presencial, lo que ayudará a los turistas a decidir qué lugares visitar y evitar perderse a través de los sitios turísticos.
- Acceder a las locaciones en diferentes estaciones y en el pasado, lo que permitirá a las personas descubrir nuevos lugares independientemente de las condiciones presentes.
- Brindar accesibilidad a las personas que no pueden visitar los lugares turísticos del país, pues estos *tours* virtuales pueden ser accesibles desde cualquier parte del mundo (IndustryARC, s. f.).

Otra cuestión presente en el turismo submarino, es la posible invasión de estas actividades a las labores de pesquería artesanal, lo que desencadena el desplazamiento de la mano de obra de estos sectores productivos (Tinoco, 2003). Por lo general, estas actividades no son planificadas ni ordenadas debido a las necesidades de los usuarios y la falta de comunicación, coordinación y diálogo entre los sectores. Esto trae como consecuencias el deficiente aprovechamiento de los servicios ecosistémicos y una caída en la contribución del bienestar general (COMUMA, 2015). Por ello, el uso de estas tecnologías de realidad virtual para la sumersión no presencial de las personas en el ambiente turístico busca evitar el conflicto entre la actividad pesquera y turística, y fomentaría el uso de estos recursos para prevenir futuras disputas en zonas similares. Por otra parte, debido a la proliferación del SARS-CoV-2, las actividades turísticas han sido restringidas a nivel mundial ya que el movimiento de personas a través del mundo ha sido reconocido como una de las causas principales de la expansión de este virus (Baum & Hai, 2020). El alto al turismo ha significado pérdidas económicas considerables reflejadas en la caída en un 23 % a nivel mundial de las actividades

productivas en el momento extremo de la crisis (Škare et al., 2021). Particularmente, la ausencia de esta actividad productiva afectó a la economía peruana en una caída del PBI de 0,6% (ver figura A.1). Según Jorge Zúñiga, experto en hotelería y turismo, muchas actividades económicas, entre ellas el turismo, podrán adaptarse para que, con ayuda de la tecnología y una reinversión digital, se pueda afrontar las secuelas generadas por la pandemia (Congreso de la República, 2021). Por ello, el uso de estos recorridos virtuales pretende reactivar el turismo en el Perú, así como evitar la propagación del SARS-CoV-2 a través de actividades presenciales como los son el turismo tradicional.

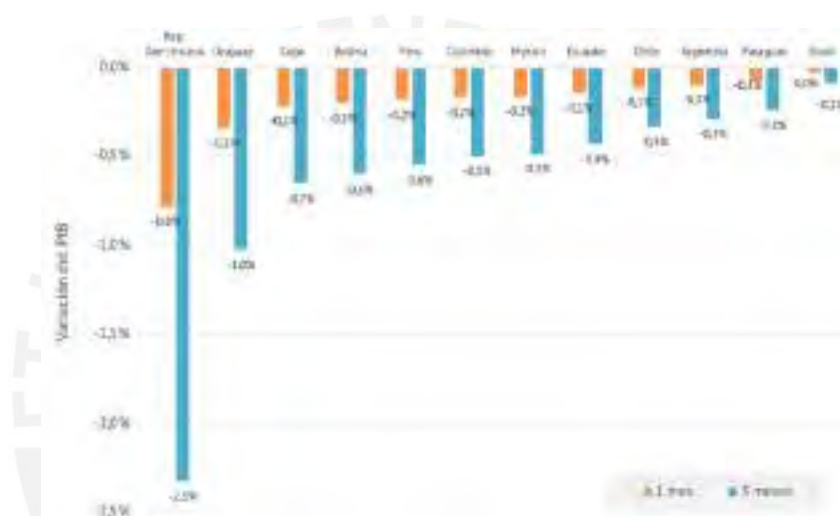


Figura A.1: Impacto en el PIB derivado de la caída del sector Turismo 2020 (Fuente: celag).

A.1.2 Metodología – descripción detallada

En un principio se analiza la razón de la solicitud del producto a desarrollar, donde se enlistan los requerimientos del sistema para obtener una visión general de las exigencias solicitadas. Paralelamente, se requiere realizar una investigación de los proyectos y productos comerciales afines a la aplicación específica. Luego, se analiza y compara el funcionamiento de los modelos similares al sistema solicitado.

Posteriormente, se identifican las entradas y salidas, así como las funciones a desarrollar. Tomando como base estas características evaluadas, se realiza la matriz morfológica que permitirá identificar las tecnologías tentativas que satisfacen cada función del sistema. A partir de ello, se proponen tres conceptos de solución a los cuales se les aplicará una evaluación técnico-económica para obtener el concepto de solución óptimo y desarrollarlo en detalle.

El diseño del sistema se divide en tres dominios principales: mecánico, electrónico y de control. En un principio, se plantea en conjunto el diseño de componentes de aislamiento, estructura de soporte del sistema y selección de componentes electrónicos principales con el fin de cubrir los requerimientos mecánicos y electrónicos enlistados en el desarrollo conceptual de la solución. Cabe resaltar que se debe justificar el diseño mecánico mediante cálculos durante el desarrollo de ingeniería. En este sentido, en caso no exista concordancia entre el diseño base del sistema y los requerimientos, se debe modificar este tal que abarque parcial o totalmente lo solicitado. Para validar los resultados teóricos se realizan simulaciones en el software Autodesk Inventor ya que este permite analizar los esfuerzos y deformaciones mediante simulaciones por elementos finitos.

A partir del diseño y selección iniciales, se realiza la selección de los componentes electrónicos restantes que no interfieran con el diseño base. Luego, se diseñan los componentes mecánicos requeridos que permitan la conexión entre los elementos mecánicos y electrónicos anteriormente diseñados y seleccionados. Paralelamente, se diseñan los circuitos y diagramas esquemáticos necesarios utilizando el software Fusion 360, estos circuitos engloban las conexiones electrónicas, distribución energética y control de componentes. Así, se utilizará el software Proteus para simular los circuitos propuestos y validar su funcionamiento.

El desarrollo del dominio de control se realiza finalizado el diseño mecánico inicial y la selección de sensores. Así, el diseño se divide de acuerdo a los subsistemas de iluminación y estimación de posición, de los cuales se proponen y diseñan las estrategias y algoritmos de control de los componentes asociados, véase sensores y actuadores que involucren cada subsistema. Para validar los algoritmos de localización basados en modelos matemáticos propuestos se utilizará el software MATLAB.

Finalmente, se realizan la documentación de ingeniería correspondiente (planos mecánicos, electrónicos y códigos de programación) y la implementación física de un prototipo realizando pruebas en un entorno controlado; luego, se analiza y compara los resultados obtenidos.

A.2. Marco teórico

A continuación, se presentará los antecedentes y consideraciones teóricas por subsistema para el desarrollo del proyecto.

A.2.1 Subsistema de adquisición de imágenes

Disparidad de píxeles

Para definir la disparidad, es necesario analizar dos imágenes que se encuentren en planos paralelos tomadas con dos cámaras iguales, cuyos ejes ópticos son paralelos y con la misma distancia focal, separados una distancia “B”, llamada línea base (*baseline*). De este modo, la línea base es paralela a la coordenada “x” de las imágenes (ver figura A.2), considerando un punto “P” que pertenece a las dos imágenes en diferentes posiciones, la disparidad de píxeles es la diferencia entre las coordenadas horizontales del punto “P” que pertenece a las dos imágenes (Lecumberry, s. f.). En este sentido, la disparidad de píxeles es un indicador del porcentaje de superposición entre dos imágenes que poseen información compartida.

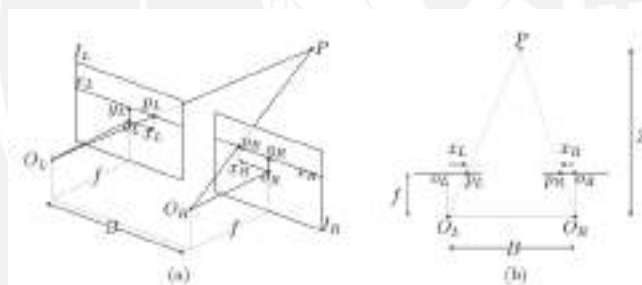


Figura A.2: (a) Configuración del par de cámaras, (b) Relación geométrica para obtener la disparidad (Fuente: Lecumberry).

Distorsiones ópticas debido al ambiente submarino

En entornos submarinos, la adquisición de imágenes se ve influenciado debido a los diferentes materiales y técnicas de fabricación de las carcasas de protección que están próximas al lente de la cámara, pues, es posible que se produzcan distorsiones curvilíneas fuertes, aberraciones ópticas como las de tipo cromática lateral y axiales, astigmatismo, etc (Fabio Menna et al., 2017). En este sentido, los lentes acoplados a los contenedores de las cámaras son diseñados para ser planos (*flat port*), o esféricos (*dome port*) (Fabio Menna et al., 2018).

Los puertos planos son las carcasas a prueba de agua más utilizadas en cámaras digitales compactas ya que su fabricación es menos costosa que los domos. Este

elemento separa dos medios que se caracterizan por poseer diferentes índices de refracción, en consecuencia, los rayos de luz se desvían de su trayectoria original cuando pasan por el puerto. Específicamente, cada rayo se dobla hacia el eje normal de la superficie límite (en este caso, del puerto) de acuerdo con la ley de Snell. Este fenómeno hace que el campo de visión de la cámara se reduzca, aumente la distorsión del lente y aumente la distancia focal, lo que aumenta el tamaño del objeto a una misma distancia si la cámara estuviera en un ambiente en la superficie. Adicionalmente, debido a este cambio en el índice de refracción, se genera una distorsión radial en la imagen (ver figura A.3), acompañado de una aberración cromática; pues, cuando los rayos de luz se refractan en las diferentes ondas de color separadas, no viajan a la misma velocidad, lo que ocasiona superposición de componentes separados, pérdida de nitidez y saturación de color (Fabio Menna et al., 2016).



Figura A.3: Distorsión radial generada por el puerto plano

(Fuente: Menna et al.).

El uso de puertos domo (también llamado *glassdome*) solucionan los problemas introducidos por el puerto plano, es decir, conserva el campo de visión y la distancia focal de la cámara. Debido a que el domo es una lente concéntrica que actúa como un elemento óptico adicional, la imagen se forma hacia la izquierda (ver figura A.4), es decir, frente a la cúpula. Esta imagen es llamada imagen virtual, la cual es vertical y más pequeña que el objeto. Cabe aclarar que en un puerto de cúpula esférica cuyo radio es R , la imagen virtual de un objeto en el infinito se proyectará frente a la cúpula a aproximadamente $4R$ del centro de la cúpula esférica o $3R$ del vidrio de la cúpula. Otra consecuencia del uso de domos son las aberraciones esféricas generadas debido a que los rayos de luz en las periferias del puerto no convergen en el mismo punto focal. Como resultado no existe un solo plano de la imagen lo que produce un resultado borroso (Fabio Menna et al., 2016).

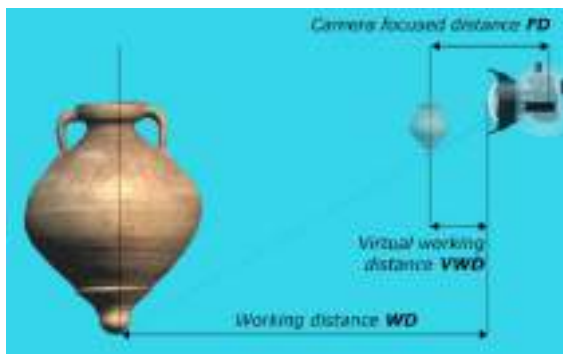


Figura A.4: Efecto del puerto tipo domo (Fuente: Menna et al.).

Una investigación realizada para comparar los resultados obtenidos en la creación de modelos 3D virtuales a partir de fotografías tomadas con los dos lentes mostró que el uso puertos planos genera un elevado error y reducción en la precisión de los modelos digitales. Además, se observó que los canales de colores de las imágenes fueron afectadas debido al desenfoque en las esquinas lo que podría degradar la precisión del procesamiento (Fabio Menna et al., 2018).

Fotografía con cámara única

En la fotogrametría terrestre, también llamada fotogrametría no topográfica, se basa en la adquisición de datos en locaciones cerca de la superficie de la tierra y proporciona información dimensional detallada de un objeto. Cuando el tamaño del objeto y la distancia entre la cámara al objeto son menores a 100 m, la fotogrametría terrestre es definida como fotogrametría de corto alcance, un enfoque en el cual las imágenes son adquiridas alrededor de un objeto y posee aplicaciones en biomecánica, biología, arqueología, arquitectura, entre otros (Jiang et al., 2008). En este sentido, para la recolección de imágenes que servirá como data para la generación del modelo 3D del objeto, el uso de una cámara única es preferente en este tipo de aplicaciones. Esto debido a que se prioriza la obtención de imágenes de alta resolución y no se toma en cuenta la zona de cobertura de las imágenes, esto permite la extracción de un mayor número de características y la reconstrucción de un modelo digital con superficies y geometrías complejas con alta precisión. Una de las aplicaciones de la fotogrametría de corto rango con cámara única es la fabricación mediante manufactura aditiva de modelos 3D creados a partir de antiguos y modernos artefactos (ver figura A.5), en la cual la orientación de toma de imágenes generalmente converge hacia el centro del objeto (Kaufman et al., 2015).



Figura A.5: Modelo original (izquierda) y nube de puntos generada mediante fotogrametría con cámara única (derecha) (Fuente: Kaufman et al.).

Fotografía multi cámara

En la fotografía de ambientes para la generación de su modelo 3D, el uso de múltiples cámaras permite una cobertura más amplia del área de interés. Este sistema se ha implementado en productos comerciales e investigación, en este último ámbito se han realizado pruebas con hasta cinco cámaras GoPro de 12 MP montadas en un UAV, cuatro de ellas montadas de forma oblicua para tomar imágenes desde casi desde cualquier ángulo de visión (Wierzbicki, 2018). El uso de múltiples es beneficioso para estos sistemas pues se reduce el tiempo de operación ya que es posible ocupar mayor área en el mismo tiempo.

Un estudio realizado con el sistema trifocal *ROV-Attached Trifocal System* muestra una relación entre la distancia del sistema al objeto, la distancia base entre cámaras y la disparidad entre píxeles. Esta investigación muestra los resultados experimentales para distancias base entre cámaras de 15, 10 y 5 cm (ver figura A.6) y se concluye que se prefiere una menor distancia base para la adquisición de imágenes de corto alcance (Nawaf et al., 2018). En este sentido, otros sistemas de adquisición de imágenes como el SeaArray muestran una distribución triangular de cámaras orientadas verticalmente, con una mayor separación que posibilita abarcar mayor zona y permite la superposición de las imágenes laterales del 60% y una superposición frontal del 80% (Wright et al., 2020).

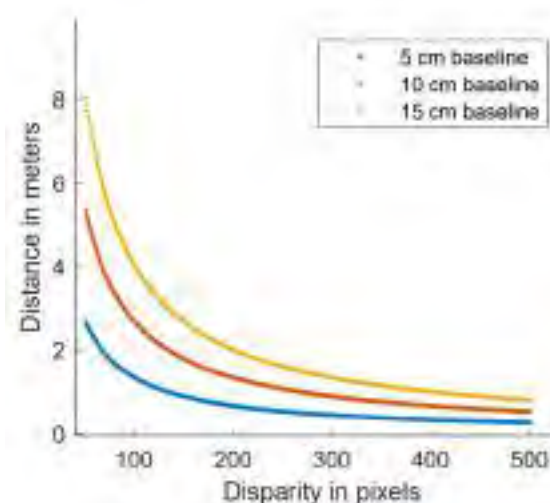


Figura A.6: Distancia de adquisición versus disparidad en píxeles para tres diferentes distancias base entre cámaras (Fuente: Nawaf et al.).

El uso de múltiples cámaras presenta ventajas diversas, no obstante, los costos involucrados para la fabricación del sistema aumentan, así como aumenta la complejidad en el diseño mecánico y en los circuitos de control para la sincronización de las cámaras. Finalmente, otros sistemas como el ROV 3D, utilizan este sistema multi cámara para otros procesos como la estimación de la posición mediante odometría visual (Drap, Seinturier, et al., 2015).

A.2.2 Subsistema de estimación de desplazamiento

Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es nombrado gracias a su creador Rudolph E. Kalman, quien en 1960 publicó su famoso artículo en el cual describía una solución recursiva al problema de filtrado lineal de datos discretos. Este algoritmo es esencialmente un conjunto de ecuaciones que implementan un estimador de tipo predictor-corrector óptimo en el sentido de que minimiza la covarianza de error estimada (Welch & Bishop, 2001). El filtro de Kalman usa una serie de datos observados durante el tiempo, los cuales contienen ruido y otras inexactitudes, y los fusiona para estimar las variables de interés con mayor precisión. Este filtro juega un rol importante en el campo de navegación para la estimación de posición y en el ámbito del procesamiento de imágenes digitales (Welch & Bishop, 2001). Una representación del filtro de Kalman se puede apreciar en la figura A.7.

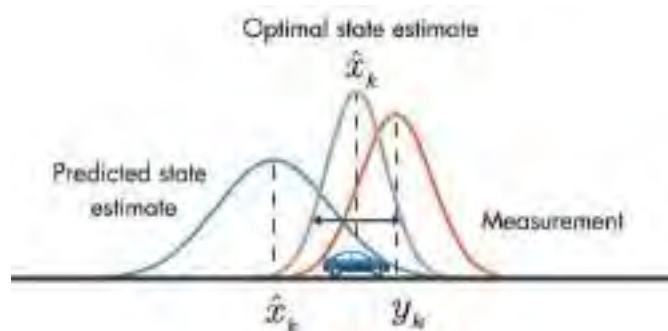


Figura A.7: Filtro de Kalman (Fuente: MathWorks).

Navegación por estima

También llamado *dead reckoning*, es un algoritmo que utiliza la información de aceleración, velocidad y altitud obtenidas por sensores para estimar la posición en tiempo real en función de la posición en un momento anterior. Este sistema de posicionamiento local depende completamente de la información de los sensores para estimar la posición, como las unidades de medición inercial o altímetros. Por ello, la precisión del algoritmo está influenciada por la resolución y la frecuencia de muestreo de los sensores utilizados (Zhang et al., 2019). Una representación en dos dimensiones de este método se presenta en la figura A.8.

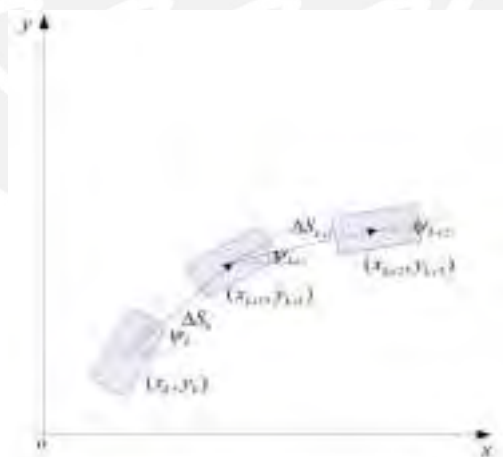


Figura A.8: Principio de la navegación por estima (Fuente: Zhang et al.).

La propagación del error es una cuestión a tener en cuenta para la navegación por estima. Se sabe que la posición actual del sistema depende la posición en un instante anterior, por lo que, debido al ruido de los sensores, se imposibilitan la extracción ideal de los datos y el error será propagado para valores futuros será elevado. Esto implica

una desviación mayor de la trayectoria estimada con respecto a la actual para un uso prolongado de este algoritmo. No obstante, para mejorar la precisión para la estimación de posición se utilizan los filtros de Kalman que reduce el ruido e inexactitudes del sistema (Tan et al., 2019).

Odometría visual

Algoritmo que estima el movimiento de una cámara basada en la entrada de un video que opera en tiempo real con bajo retardo y es utilizado para propósitos de navegación. Se basa en el seguimiento de las características de una imagen, en donde características de dos *frames* consecutivos, como los *Harrison corners*, que se encuentran dentro de cierto límite de disparidad son conectadas mediante algoritmos de visión por computadora como el SURF (Nistér et al., 2004). Después de coincidir las características de la imagen, se calculan las distancias euclídeas entre las posiciones de los pares de píxeles conectados, de las cuales se acepta la distancia mínima si la proporción entre esta y la segunda mínima es menor a un umbral definido por el usuario. Para evitar la elección de un umbral se pueden utilizar métodos de eliminación de valores atípicos como el algoritmo de RANSAC. Finalmente, el movimiento entre un par de imágenes puede ser procesado usando diferentes métodos que dependen de la configuración del objeto portador de la cámara y los sensores disponibles (Zacchini et al., 2019). Una ejemplificación del movimiento estimado de la cámara por odometría visual se presenta en la figura A.9.

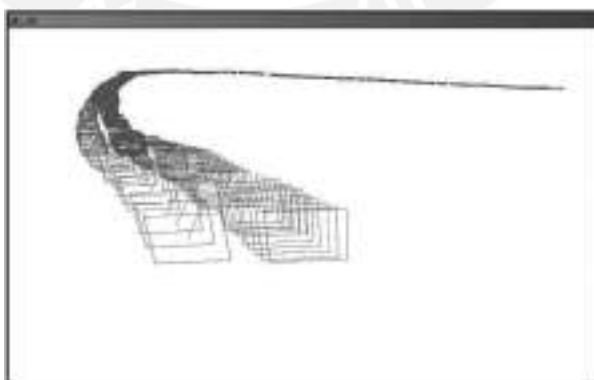


Figura A.9: Ruta de la cámara estimada en 3D (Fuente: Nistér et al.).

Underwater global positioning system

El desarrollo del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) comenzó en 1973 cuando se fusionaron varios programas militares de navegación por satélite de EE. UU, el GPS

es ahora usado para un amplio rango de usos en aplicaciones civiles. Estos dispositivos están diseñados para comprender una constelación de 24 o más satélites que orbitan en un radio de entre 25 000 y 30 000 km, lo que garantiza que las señales de al menos cuatro satélites estén disponibles en cualquier ubicación. Para determinar la posición, el dispositivo se basa en la información recibida por los satélites (posición orbital y tiempo en el que se envió la información) para determinar con exactitud la posición actual del sensor (Groves, 2008). No obstante, este método de localización no es aplicable a ambientes submarinos debido a la imposibilidad de transmisión electromagnética submarina (Antonelli, 2004). Por ello, es necesario el uso de otras técnicas que se asemejen al funcionamiento del GPS en entornos subacuáticos. Una propuesta es el uso de un sistema novedoso de posicionamiento acústico submarino, el cual utiliza boyas equipadas con receptores GPS y capacidad de comunicación acústica, este sistema es llamado *GPS Intelligent Buoys* (GIB) (ver figura A.10). El sistema está diseñado para rastrear la posición de un objeto submarino equipado con un emisor acústico midiendo los tiempos de llegada de las señales acústicas a un conjunto de boyas equipadas con hidrófonos sumergidos y receptores GPS. Este sistema permite conocer la posición del objeto con un proceso similar al utilizado para la determinación de posición mediante satélites (Alcocer et al., 2006).



Figura A.10: Sistema GIB (izquierda) y boyas utilizadas antes de su despliegue (derecha) (Fuente: Alcocer et al.).

Underwater acoustic positioning systems

Los enfoques clásicos para el posicionamiento de objetos bajo el agua se basan en tecnologías de posicionamiento acústico que incluyen *Long Baseline* (LBL), *Short Baseline* (SBL) y *Ultra-Short Baseline* (USBL) (Alcocer et al., 2006). El sistema LBL

deriva la posición del objeto con respecto a un arreglo de transmisores acústicos desplegados en el fondo marino que sirven como puntos de referencia para la navegación. La posición estimada de alta precisión se genera a partir de la triangulación de la información que proveen estos transmisores los cuales están separados de 100 hasta 6 000 m. No obstante, su uso implica la utilización de equipamiento costoso y complejo (Vickery, 1998).

Por otra parte, el SBL deriva la posición de un objeto de la detección del tiempo de llegada relativo de las señales acústicas de múltiples transeptores montados en la superficie separados entre 20 y 50 m. Este sistema presenta alta precisión en la estimación de posición y baja complejidad; no obstante, la precisión de posición absoluta depende de sensores adicionales como giroscopios y unidades de referencia vertical (Vickery, 1998).

Finalmente, el USBL se basa en un conjunto de antenas acústicas montadas en la parte inferior de un barco que consta de cuatro hidrófonos que reflejan una señal emitida por el transeptor ubicado en el objeto submarino de interés. La medición del tiempo de llegada de la señal acústica de respuesta, en conjunto con la orientación del conjunto de las antenas en el instante de la recepción, son utilizados para la medición de la posición del objeto submarino. La mayor ventaja de los sistemas USBL es su fácil implementación (el sistema consta solo de dos nodos) y un alcance relativamente largo. Por otro lado, la precisión de los USBL se deteriora con la distancia y, debido a la propagación de la onda acústica, las mediciones son escasas (llegan a intervalos medidos en segundos) y el tiempo se retrasa dependiendo de la distancia entre el nodo receptor y el transmisor (Opderbecke, 1997) (Mandić et al., 2016). Los sistemas de posicionamiento acústico presentados se pueden apreciar en la figura A.11.

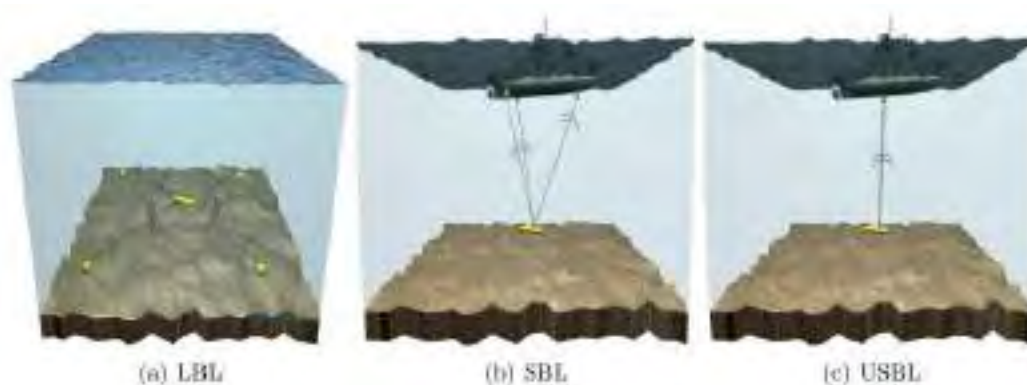


Figura A.11: Representación del *Long Baseline* LBL, *Short Baseline* SBL y *Ultra-Short Baseline* USBL (Fuente: Alcocer et al.).

Tabla comparativa de soluciones para estimación de posición

En la tabla A.1 se muestra una comparativa de las alternativas presentadas para el sistema de localización. Se puede apreciar que el método de odometría visual hace uso de un único sensor mientras que para los otros métodos es necesario utilizar al menos 2 para mejorar la precisión de posicionamiento. Además, se puede observar que la navegación por estima es el método que posee menor tiempo de respuesta (1 milisegundo), seguido por la odometría visual con 20 ms, y por último las soluciones por hardware que implican un tiempo mayor a un segundo. Finalmente, se observa que las soluciones por software, que presentan sensores que están en contacto con el módulo (*on-board*), poseen un rango ilimitado debido a que no dependen de la distancia efectiva de alcance de sensores *off-board*.

Tabla A.1: Comparativa entre soluciones para estimación de posición (Fuente: Elaboración propia).

Solución	Navegación por estima	Odometría visual	<i>Underwater global positioning system</i>	<i>Underwater acoustic positioning systems</i>
Tipo	Software	Software	Hardware	Hardware
Sensores Involucrados	IMU, altímetro, etc.	Cámara	GPS, transceptores y transductores	Transceptores, transductores, giroscopios, etc.
Tiempo de respuesta	<10 ms	>20 ms	>2 s (*)	>1 s (*)
Rango	Ilimitado	Ilimitado	-	<6000 m
Precisión	-	< 95.14 % del recorrido total	-	>1 m

(*) Tiempo estimado a una distancia de 600 m del transceptor más lejano.

A.2.3 Subsistema de iluminación

Los ambientes submarinos presentan propiedades de iluminación específicas comparadas con el mundo exterior, especialmente influenciadas por la pérdida de color conforme aumenta la profundidad de sumersión. Los colores que componen la luz blanca son el violeta, azul, verde, amarillo, anaranjado y rojo, lo cuales son afectados por diversos factores como la proximidad a la costa, la estación, las condiciones de la superficie del agua, la hora del día, la nubosidad del cielo, entre otros (Liarokapis et al., 2017). La pérdida de color es estimada en la figura A.12.

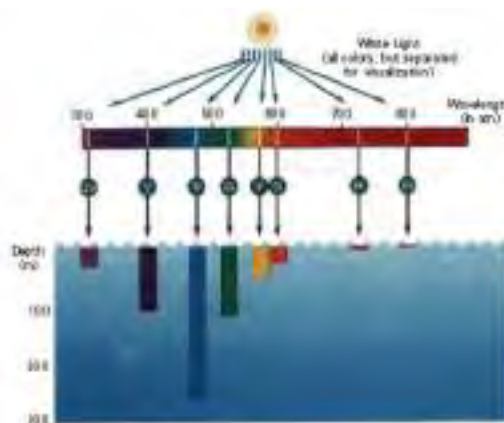


Figura A.12: Estimación de la pérdida de color (Fuente: Martínez, Isodoro).

Así, la profundidad del agua no solo afecta los colores de la luz bajo el agua, sino también la intensidad de la cantidad de luz. Pues, aproximadamente dentro los primeros 10 m, el agua absorbe más del 50 % de la energía de la luz visible (ver figura A.13). Este fenómeno es llamado atenuación de la luz que es la disminución gradual de la intensidad de la luz a medida que viaja a través de la materia (Earth Exploring our Fluid, s. f.).

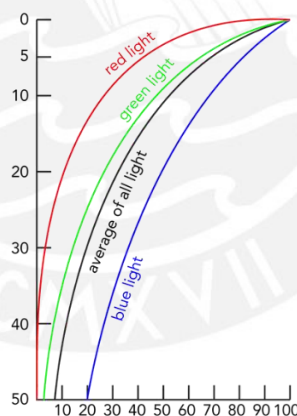


Figura A.13: Profundidad – Porcentaje de decaimiento de la intensidad de luz (Fuente: Inouye, Byron)

Para aplicaciones submarinas es recomendable el uso de luz blanca debido a que contiene todo el espectro de colores, lo que permite la obtención de todas las características y colores contenidos en los ambientes submarinos (Liarokapis et al., 2017). En este sentido, el nivel de brillo (medido en lumens) requerido para este tipo de aplicaciones dependerá de la profundidad de sumersión, del área efectiva de adquisición de datos y el grado de sensibilidad a la luz de las cámaras a utilizar.

A.3. Estado del arte – descripción detallada

A continuación, se presentará una descripción detallada de los sistemas relacionados encontrados en la literatura.

A.3.1 Sistemas comerciales

ORUS 3D series

En el ámbito de la fotogrametría submarina industrial, los modelos ORUS 3D desarrollados por la empresa francesa COMEX, líder mundial en fotogrametría submarina, son reconocidos como los sistemas más avanzados para aplicaciones en ingeniería civil, ciencias marinas y arqueología, entre otros (COMEX, s. f.). Estos módulos presentan sistemas de tres cámaras, una de ellas de alta resolución y dos de baja resolución, cada una con una frecuencia de muestreo que asegura la cobertura total del área para generar modelos 3D de alta precisión con una resolución de 1 mm (Drap, Merad, et al., 2015). Por otra parte, cada cámara utiliza un *glassdome* para corregir la distorsión de las imágenes en consecuencia del ambiente subacuático. En este sentido, estos módulos cuentan con un sistema de iluminación conformado por cuatro diodos emisores de luz con una intensidad de 74 000 lumens, así como un sistema de referencia de rumbo y sensores de altitud, presión y temperatura (COMEX, 2016) (Fabio Menna et al., 2019).

El ORUS 3D permite el manejo de grandes volúmenes de datos en tiempo real, así como su análisis para determinar la odometría del módulo, la cobertura real de imágenes y la rápida reconstrucción 3D a partir de la *data* tomada (COMEX, 2016). Los modelos comerciales ORUS 3D se diferencian de acuerdo a la profundidad máxima de sumersión a la cual pueden operar (ver figura A.14), estos módulos están destinados para su acople a ROV's o UAV's. No obstante, debido a las complicaciones para su manejo en zonas estrechas, como cuevas submarinas, se ha desarrollado un módulo que cuenta únicamente con un sistema bifocal que pueda ser manejado por un buzo en zonas de difícil acceso (COMEX, s. f.) (ver figura 2.15).



Figura A.14: (a) Sistema de 300 m, (b) sistema de 3000 m, (c) sistema de 6000 m, (d) sistema para uso de buzo (Fuente: COMEX).



Figura A.15: Módulo bifocal en operación (Fuente: COMEX).

SubSLAM X2

Desarrollado por la empresa ROVCO, SubSALM X2 es un sistema inteligente de colección de *data* en tiempo real capaz de transmitir en vivo hacia cualquier dispositivo las estructuras 3D submarinas reconstruidas mediante fotogrametría con una precisión de 16 mm, y hasta una precisión de cuatro mm mediante procesamiento *offline*. Destinado para su acople con cualquier tipo de ROV (ver figura A.16), con una profundidad máxima de sumersión de 1000 m, este sistema cuenta con un sistema de doble cámara de baja sensibilidad a la luz con una resolución de 16 MP y proporción de adquisición de hasta 40 fps. Una característica destacable de este sistema es la posibilidad del uso de técnicas de aprendizaje de máquina e inteligencia artificial (ML e IA, por sus siglas en inglés), lo que permite su uso en diversas aplicaciones de reconocimiento y procesamiento de datos. El módulo está equipado con un subsistema de posicionamiento relativo sin el uso de componentes de referenciación submarina como USBL, LBL o INS lo que implica una reducción en los sensores involucrados durante su funcionamiento (ROVCO, 2019).



Figura A.16: (a) SubSLAM X2, (b) conexión del módulo a un ROV submarino (Fuente: ROVCO).

Pro Squid 2

Sistema destinado a la visualización en tiempo real de los ambientes submarinos a través de la integración de una cámara en su *enclosure* ubicado en la parte central de la estructura. El primer modelo de esta serie Pro Squid fue lanzada en el año 2014, y cinco años después salió al mercado el segundo modelo que permite la incorporación de diferentes modelos de cámaras, donde generalmente se utiliza con la incorporación de una GoPro (ver figura A.17). Este modelo permite la sumersión en ambientes subacuáticos con su estructura de policarbonato hasta 100 m, y hasta 300 m con una estructura de aluminio. Así, debido a las condiciones de iluminación en el entorno submarino, se incorpora un sistema de iluminación LED doble que proporciona un total de 3000 lumens, esto con el fin de restablecer los colores absorbidos por el ambiente subacuático. Finalmente, este sistema permite el control total de sus operaciones y adquisición de datos a través de una conexión alámbrica hasta estaciones en superficie (SPOTX, 2019).



Figura A.17: Pro Squid 2 (Fuente: SPOTX).

Sistemas de cámaras submarinas

Uno de los módulos comerciales más utilizados para fotografía submarina de uso personal es el sistema de cámara submarina ensamblable. Este sistema permite su manejo por un buzo debido a su reducido tamaño y simplicidad; en este sentido, el módulo está conformado por una cámara DSLR de alta resolución (hasta 20 MP) de las marcas Nikon y Canon, preferentemente adicionada a un lente *glassdome* para mejorar el acercamiento a los entornos. Se utiliza un aislamiento para evitar el contacto de la cámara por medio de una carcasa protectora a la cual se le conectan dos brazos que sirven de soporte para las luces LED para la iluminación durante las actividades (Scuba Diving, 2019). Debido a las diferentes combinaciones de componentes individuales que conforman el sistema, como lo son la cámara o los elementos de iluminación, no existe un modelo específico para este tipo de módulos, uno de estos sistemas se puede apreciar en la figura A.18.



Figura A.18: Canon 1D× Mark II (Fuente: DPREVIEW).

A.3.2 Proyectos de investigación

Underwater stereo vision system

Sistema *low-cost* desarrollado con el objetivo de evaluar los requerimientos de visión subacuáticos. El módulo ha sido diseñado con un correcto balance entre consumo de energía, disipación térmica y desempeño del sistema. El sistema bifocal utiliza dos cámaras industriales AVT Mako G125C GigE con una resolución de 1.2 MP y una proporción de adquisición de 30 fps, las cuales están alojadas en dos recipientes de PVC envueltos por una cubierta de acero inoxidable. Se utiliza un contenedor de acero inoxidable que permite la sumersión hasta una profundidad máxima de 50 m para proteger los elementos electrónicos de control (ver figura A.19). La unidad de control

electrónico (ECU, por sus siglas en inglés) está compuesto por una Raspberry-Pi, utilizada para codificar imágenes en una transmisión de video H264 estándar para monitoreo remoto debido a su codificador de video MPEG-2 integrado; un microcontrolador Arduino MEGA 2560, el cual es responsable de la activación sincronizada de las cámaras; y dos CPU x86, utilizados para el control general del sistema. Estos están basados en un Intel Core i7-4770TE @ 3.33GHz con cuatro núcleos físicos y un Intel DN2800MT Mini-IT× con un procesador ATOM 1.86GHz (Oleari et al., 2015). El interior de las cámaras y los elementos electrónicos se puede apreciar en la figura A.20.



Figura A.19: Contenedor del sistema de control (izquierda) y Contenedores de las cámaras (derecha) (Fuente: Oleari et al.).



Figura A.20: Componentes del sistema electrónico de control y visión (Fuente: Oleari et al.).

SeaArray

SeaArray es un proyecto desarrollado por una asociación entre el Servicio de Parques Nacionales (NPS, por sus siglas en inglés), ubicado en Washington D. C., y Marine Imaging Technologies (MiTech). Este sistema de fotogrametría multi cámara, posee un sistema de autopropulsión el cual es operado por un buzo (ver figura A.21) y cuenta con un arreglo de tres cámaras Nikon Z1 de 45.7 MP para la captura de imágenes de alta resolución capaz de adquirir 10 800 imágenes por hora, lo que permite cubrir áreas en el orden de las hectáreas. El sistema modular está basado en una estructura de fibra de carbono con brazos pivotantes construida alrededor del subsistema de propulsión; así, para la protección de las cámaras se utilizaron contenedores personalizados en conjunto con lentes Rokinon.

El subsistema de control personalizado, incluye un control sincronizado e independiente de las cámaras, un detector de ingreso de agua y una interface multimedia de alta resolución (HDMI, por sus siglas en inglés) que muestra la información obtenida de las cámaras e información del estado del sistema como el *ratio* de captura personalizado, configuración de las cámaras sincronizadas e indicadores de vida de batería. El espaciamiento en las cámaras del sistema está diseñado para lograr una superposición de imagen lateral de 60 % (recomendado por Agisoft Metashape, software que utiliza técnicas de fotogrametría para generar modelos 3D digitales), y posee un accionador de cámaras automático ajustable que, en conjunto con la velocidad de viaje y la tasa de recopilación típica de 1 fps, permite la superposición frontal del 80%. Uno de los beneficios de SeaArray es la superposición adicional entre imágenes, lo que a su vez permite la creación de un mayor número de puntos generados por el software, posibilitando un mayor número de puntos de enlace dentro del modelo (Wright et al., 2020).



Figura A.21: SeaArray operado por un buzo (Fuente: Wright et al.).

ROV 3D

El sistema ROV 3D fue diseñado para ser montado en un vehículo subacuático de bajo peso controlado remotamente, el cual fue optimizado en tamaño y peso para su ensamble. Durante su funcionamiento el operador es capaz de acceder a su unidad de adquisición a bordo vía conexión Ethernet (Drap, Seinturier, et al., 2015). Este sistema posee una cámara a 2 Hz AVT PROSILICA GT6600 de alta resolución (hasta 28.8 MP) y dos cámaras a 10 Hz AVT PROSILICA GT1920 de baja resolución (hasta 2.8 MP), las cuales están montadas en contenedores separados que las aíslan del agua y se conectan a la unidad de control encapsulada en un contenedor adicional (ver figura A.22). Así, para obtener imágenes con adecuada iluminación, se usó un subsistema de iluminación basados en LED controlado por la unidad de control (Drap, Merad, et al., 2015).

Este módulo es capaz de adquirir una amplia cantidad de datos mediante el uso de sus tres cámaras; en este sentido, el uso de este sistema trifocal posee dos objetivos: el primero es la computación de la posición por medio de técnicas de visión por computadora, como la odometría visual, la cual asiste al operario para asegurar la cobertura total de la zona. El segundo objetivo es la reconstrucción 3D *offline* del ambiente sensado, lo que involucra el uso de imágenes de alta resolución para generar un modelo preciso. Cabe aclarar que la reconstrucción 3D no es contemplado durante su operación, pues el sistema descrito es encargado del registro y la extracción de características de las imágenes adquiridas (Drap, Seinturier, et al., 2015). El sistema se presenta esquematizado en la figura A.23.



Figura A.22: Imágenes del sistema conectado al Rémora 2000 ROV (a) lista de las tres cámaras sincronizadas, (b) vista del subsistema de control encapsulado (Fuente: Drap, Merad, et al.).

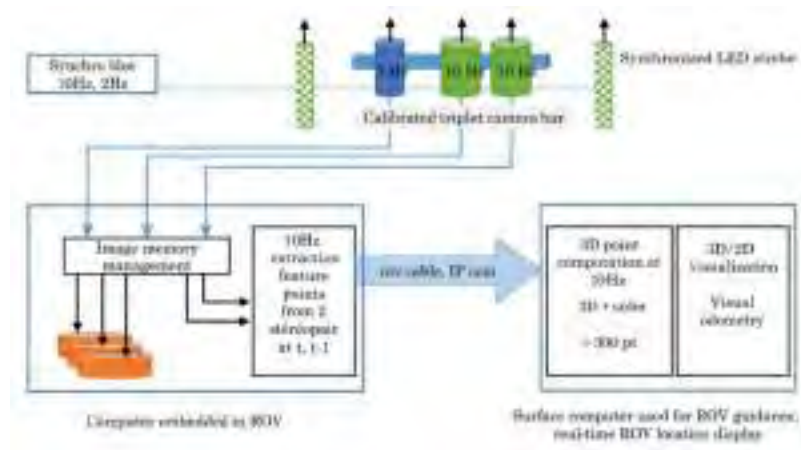


Figura A.23: Esquemático del sistema de adquisición de imágenes y su conexión con el ROV (Fuente: Drap, Seinturier, et al.)



A.4. Diseño conceptual – desarrollo

A.4.1 Lista de requerimientos – resumen

LISTA DE REQUERIMIENTOS		Pág. 1 de 3
		Edición: 3
PROYECTO	Sistema de Recolección de Imágenes submarinas para la Generación de Recorridos Virtuales	Fecha: 12/04/2020 Revisado: Diego Arce
CLIENTE	Ministerio de Comercio Exterior y Turismo, Agencias Turísticas	Elaborado: Renzo Mendoza
Fecha (cambios)	Deseo o exigencia	Descripción
(03/05/21)	E	<u>Función principal</u> Adquisición y registro de imágenes submarinas y su posición relativa de obtención para una posterior generación de modelos submarinos mediante fotogrametría.
(03/05/21)	E	<u>Geometría</u> <ul style="list-style-type: none"> El módulo debe tener un tamaño máximo de $0.45 \times 0.40 \times 0.40$ m (L x W x H), respetando una distancia máxima entre elementos de sujeción de 0.5 m.
(08/05/21)	E	<u>Fuerzas</u> <ul style="list-style-type: none"> Masa máxima de 9 kg. Presión de operación máxima de 7,6 MPa (750 m de profundidad) y velocidad máxima de 2m/s.
(03/05/21)	E	<u>Energía</u> <ul style="list-style-type: none"> Uso de batería. Autonomía: 30 minutos. En el modo de uso por ROV, la alimentación de los actuadores debe ser proveída por el ROV
(08/05/21)	E	<u>Señales</u> Señales de entrada: <ul style="list-style-type: none"> Indicación de adquisición y registro de imagen, posición y orientación. Señal de encendido. Señal de apagado. Señales de salida: <ul style="list-style-type: none"> Indicador de nivel de batería. Imagen de enfoque actual. Indicador luminoso de actividad: <ul style="list-style-type: none"> Rojo: Ingreso de agua al sistema y Batería descargada. Azul: Función de recolección. Verde: Sistema en operación.

LISTA DE REQUERIMIENTOS		Pág. 2 de 3
		Edición: 3
PROYECTO	Sistema de Recolección de Imágenes submarinas para la Generación de Recorridos Virtuales	Fecha: 12/04/2020
		Revisado: Diego Arce
CLIENTE	Ministerio de Comercio Exterior y Turismo, Agencias Turísticas	Elaborado: Renzo Mendoza
Fecha (cambios)	Deseo o exigencia	Descripción
(08/05/21)	E	<p><u>Software y Control</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Sistema de control de iluminación con respecto a la intensidad luminosa de las imágenes adquiridas y la profundidad de sumersión. • Algoritmo de control para la estimación posición y orientación relativas.
(08/05/21)	E	<p><u>Electrónica (hardware)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensor para adquirir información para estimar la posición. • Sensor para obtener orientación. • Sensor adquisición de imágenes. • Sensor de identificación de ingreso de agua. • Sensor de profundidad de sumersión.
(08/05/21)	E	<p><u>Interfaz</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Visualizador de imágenes y una interfaz para visualización.
(03/05/21)	E	<p><u>Comunicaciones</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Comunicación alámbrica con el vehículo submarino, el elemento de conexión debe tener una longitud como mínimo de 2 m.
(08/05/21)	E	<p><u>Seguridad</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Elemento de apagado inmediato y protección ante ingreso de agua. • Uso de materiales resistentes a la corrosión, alta relación resistencia-peso y alto tiempo de vida útil. Véase las normas para materiales ASTM B308 / B308M, ASTM F1472 y ISO 14127:2008.
(03/05/21)	E	<p><u>Fabricación</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Manufactura aditiva para piezas de conexión, taladrado para uniones atornilladas y torneado para elementos cilíndricos. • Tolerancia máxima de 1 milímetro.
(03/05/21)	E	<p><u>Montaje</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Sistema modular para uso por buzo o vehículo submarino.
(03/05/21)	E	<p><u>Transporte</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Transporte de la carga útil en una caja de 0.5 × 0.8 × 0.8 m con un peso máximo de 10 kg.

LISTA DE REQUERIMIENTOS		Pág. 3 de 3
		Edición: 3
PROYECTO	Sistema de Recolección de Imágenes submarinas para la Generación de Recorridos Virtuales	
		Fecha: 12/04/2020
		Revisado: Diego Arce
CLIENTE	Ministerio de Comercio Exterior y Turismo, Agencias Turísticas	
		Elaborado: Renzo Mendoza
Fecha (cambios)	Deseo o exigencia	Descripción
(16/05/21)	E	<p><u>Procesamiento</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • El controlador debe poseer la capacidad computacional para los estimar la posición y orientación relativas. • El controlador debe poseer la capacidad computacional para procesar y gestionar las imágenes para su posterior registro. • El controlador debe contar la capacidad computacional para controlar los actuadores para la iluminación. • El controlador debe contar con la capacidad computacional para controlar el visualizador de información. • El controlador debe contar con la capacidad computacional para monitorear en todo momento el posible ingreso de agua.
(16/05/21)	E	<p><u>Operación</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Ambientes submarinos costeros. • Temperatura de 4 - 18°C. • Presión de operación hasta de 7.6 MPa.
(08/05/21)	E	<p><u>Ergonomía</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • El manejo del módulo debe ser por elementos con un diámetro entre 30 y 50 mm. • La longitud del elemento de sujeción debe ser mayor a 120 mm cuando se utiliza guantes. • Uso de material antideslizante, no conductor y comprimible en el área de sujeción.
(03/05/21)	D	<p><u>Mantenimiento</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento preventivo mensual.
(03/05/21)	E	<p><u>Costos</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Costo máximo de fabricación de \$ 15 000 (quince mil dólares americanos).
(03/05/21)	D	<p><u>Plazos</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Diseño del sistema: 8 meses. • Fabricación y pruebas: 2 meses.

A.4.2 Caja negra – detalle de entradas y salidas

Las señales de entrada son de los tres tipos descritos, en donde se presenta una señal para energizar y desactivar la energía del sistema, así como una señal que indica la adquisición y registro de imágenes. Cuando el módulo esté acoplado a un ROV, una señal del tipo información indicará la recolección de imágenes, una señal de tipo materia indicará su conexión física y una señal de tipo energía indicará que las luces serán alimentadas por el ROV. Durante su uso mediante buzo, este debe sujetarlo en los elementos mecánicos de sujeción para la movilización del sistema; se representa a una señal de energía eléctrica para cargar la batería incorporada en el sistema. Por otra parte, para el registro de los datos recolectados es necesario una memoria extraíble. Se muestra la entrada de agua, de tipo materia, ya que el sistema operará en un entorno submarino.

Para obtener una realimentación del sistema y del entorno, se presentan señales del tipo información que muestran datos del sistema, entorno, actividad y nivel de baterías. Las salidas del tipo energía son representadas por la luz emitida por el sistema para corregir la baja iluminación del ambiente, el calor y ruido generados por los componentes. Finalmente, las salidas del tipo materia están conformadas por la memoria con las imágenes georreferenciadas adquiridas y el agua.

A.4.3 Estructura de funciones – descripción de procesos

A continuación, se describirá en detalle los procesos involucrados en el sistema de acuerdo a sus dominios.

Dominio de comunicación

En la figura A.24 se presenta el dominio de comunicación del sistema. Cabe aclarar que este dominio solamente será funcional cuando el sistema esté en funcionamiento mediante un ROV. La comunicación sistema-ROV debe ser necesariamente mediante conexiones alámbricas ya que debido a las condiciones del entorno se imposibilita las comunicaciones por medio de emisiones electromagnéticas. La señal enviada al ROV porta información del sistema y las imágenes sensadas, y la señal recibida porta indicaciones para el registro de información.

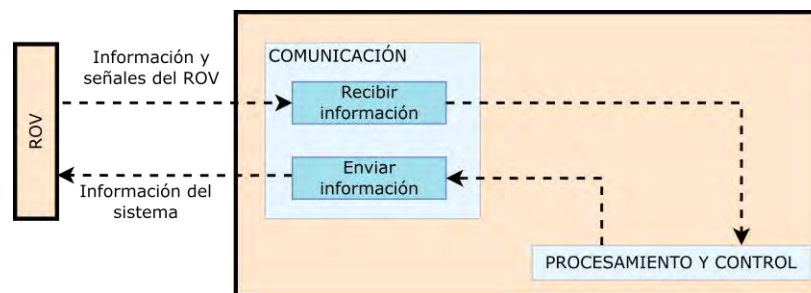


Figura A.24: Dominio de comunicación (Fuente: Elaboración propia).

Dominio de interfaz

En la figura A.25 se detalla el dominio de interfaz del sistema. Las señales de ingreso a este dominio indican la adquisición de imágenes y posición relativa, y una señal para indicar el modo de operación (ROV o buzo). Estas señales son transmitidas hacia el dominio de procesamiento y control para que se realicen las acciones respectivas. Finalmente, para que el buzo pueda visualizar la información del entorno e información del sistema, es necesario utilizar un visualizador e indicadores luminosos.

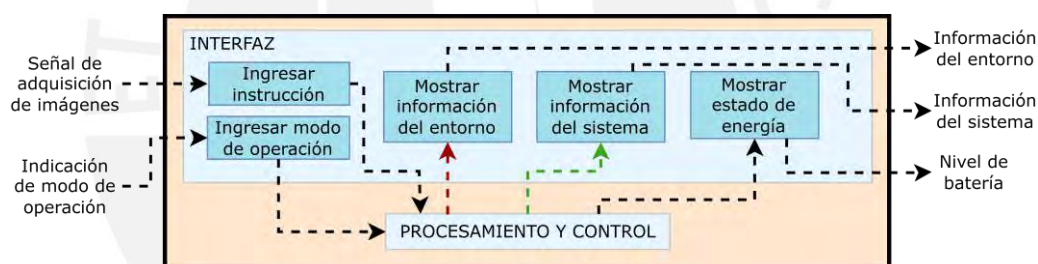


Figura A.25: Dominio de interfaz (Fuente: Elaboración propia).

Dominio de sensores

En la figura A.26 se desarrolla el dominio de sensores del sistema. Las señales medidas del exterior proporcionan información sobre la imagen del ambiente, la cual será registrada cuando se ingrese la instrucción de registro; información que permite la estimación de posición del sistema; e información sobre la presión a la cual está sometida el sistema, esta información servirá para estimar otros parámetros de operación. Las señales de medición interna proporcionan información sobre el voltaje de la batería, para determinar el tiempo de funcionamiento restante; la orientación e información para estimar la posición del sistema, que sirve para georreferenciar las imágenes durante su registro; e información sobre el ingreso de agua al sistema, para determinar si existe riesgo de daño en los elementos electrónicos y eléctricos.

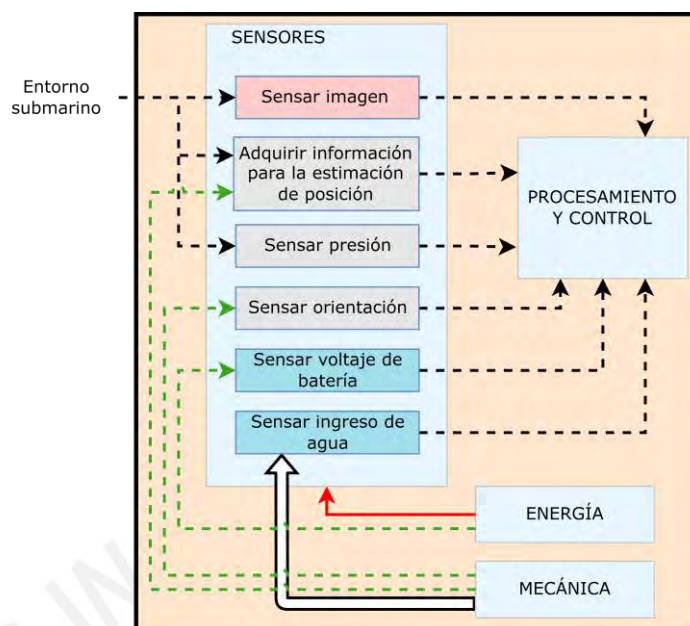


Figura A.26: Dominio de sensores (Fuente: Elaboración propia).

Dominio de procesamiento y control

En la figura A.27 se desarrolla el dominio de procesamiento y control del sistema. Se observa que las señales recibidas del dominio de sensores son utilizadas para la estimación de posición y orientación relativas del sistema, obtener el nivel de batería y procesar las imágenes sensadas. Para asegurar la integridad de los componentes eléctricos y electrónicos ante un posible ingreso de agua mediante el monitoreo constante, es necesario un control sobre el subsistema de energía para la desconexión energética de los componentes de esta naturaleza. Por otra parte, el sistema debe controlar la iluminación proporcionada por el subsistema de iluminación, para ello se requiere de la información de luminosidad de la imagen y la profundidad de sumersión, esta información será procesada para estimar la iluminación adecuada para el entorno submarino. Finalmente, es necesario un procesamiento de las indicaciones de adquisición y modo operación para establecer las acciones de registro y parámetros para su operación, respectivamente; adicionalmente, es necesario un control de los indicadores luminosos que provean señales acerca de las funciones de operación actuales.

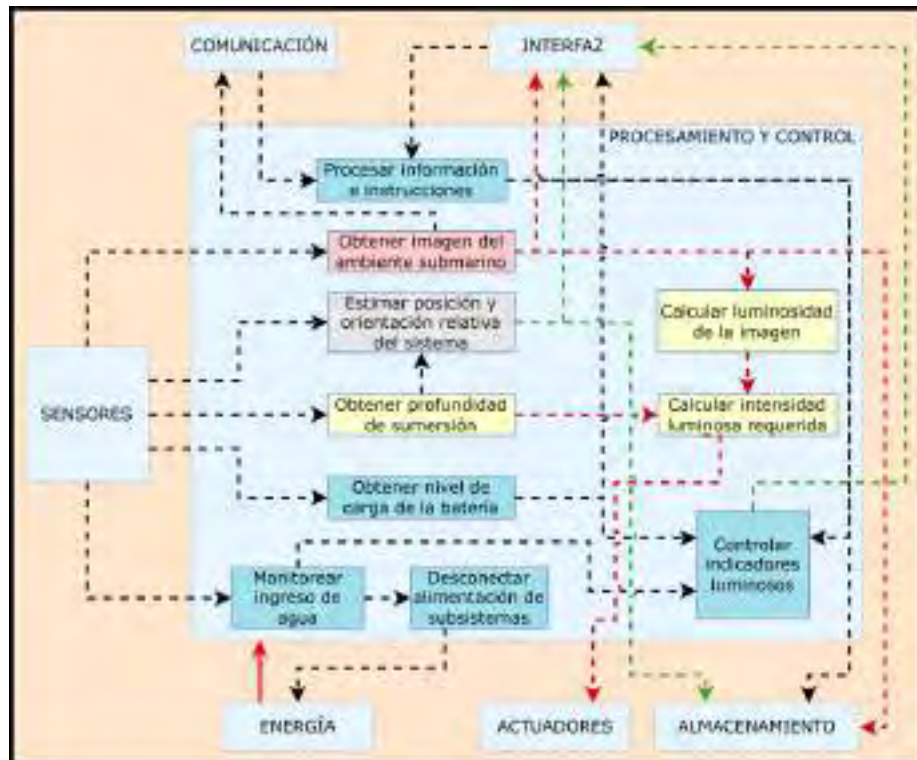


Figura A.27: Dominio de procesamiento y control (Fuente: Elaboración propia).

Dominio de energía

En la figura A.28 se presenta el dominio de energía del sistema. Una función principal en este dominio es la regulación de la fuente de energía para la alimentación de los sensores y procesadores. Debido a que es necesario gestionar de forma óptima el espacio de albergue de los componentes, se propone usar una única batería recargable para la elementos eléctricos y electrónicos del sistema. Así, la energía de ingreso que será almacenada por la batería se representa como la señal de tipo energía.

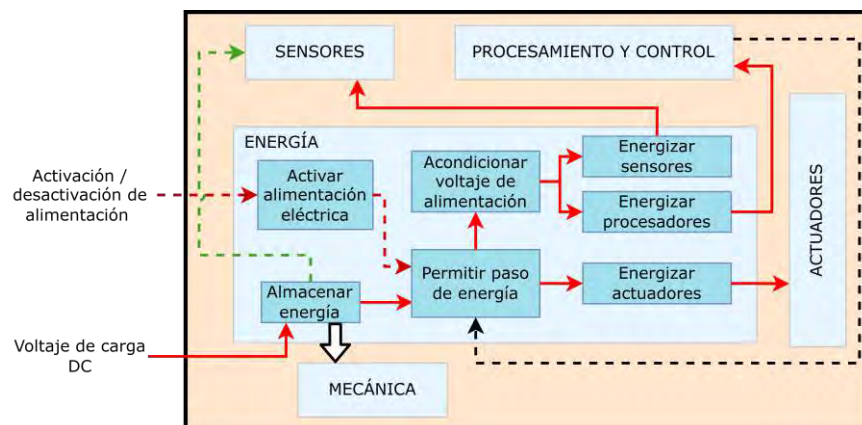


Figura A.28: Dominio de energía (Fuente: Elaboración propia).

Dominio de actuadores

En la figura A.29 se detalla el dominio de actuadores del sistema. Este dominio es alimentado por la fuente de energía eléctrica, entre estos elementos se encuentran los componentes que permiten la iluminación del entorno, los cuales convierten energía eléctrica en energía luminosa que posibilita la obtención adecuada de información del ambiente. Por otra parte, como se mencionó anteriormente, cuando el sistema se encuentre conectado al ROV, se espera que este provea de energía eléctrica al dominio de actuadores.

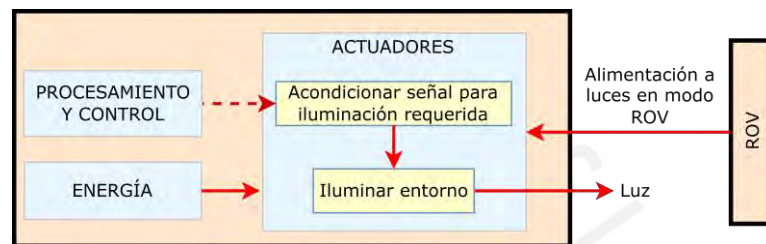


Figura A.29: Dominio de actuadores (Fuente: Elaboración propia).

Dominio de almacenamiento

En la figura A.30 se detalla el dominio de almacenamiento del sistema. Las funciones en este dominio están destinadas al manejo, administración y registro de los datos recolectados (imágenes y su posición y orientación relativa de obtención). Debido a que se necesita un componente adicional para el registro de la información, se presenta una memoria extraíble como entrada del tipo materia; en este sentido, cuando hayan terminado las operaciones de sistema y se requiera adquirir los datos registrados, se debe extraer la memoria con imágenes georreferenciadas, por ello se presenta esta como una salida del tipo materia.

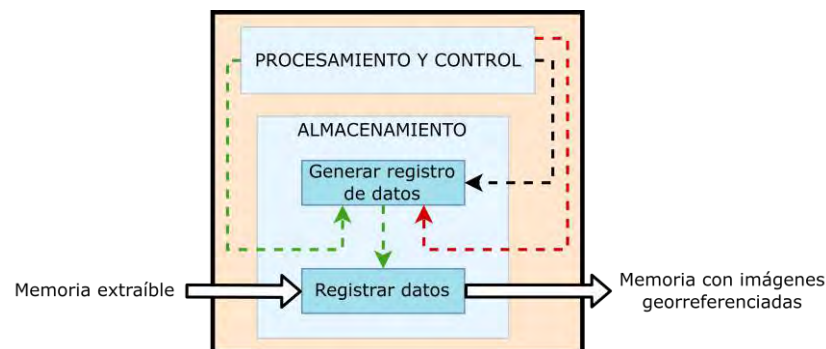


Figura A.30: Dominio de almacenamiento (Fuente: Elaboración propia).

Dominio mecánico

En la figura A.31 se detalla el dominio mecánico del sistema. Para asegurar la integridad de los sensores, actuadores, procesadores y controladores, es necesario el uso de elementos contenedores que aíslen a estos de las condiciones del ambiente submarino. Así, es necesaria una correcta distribución de los elementos en estos contenedores para gestionar eficientemente el reducido espacio. Por otra parte, la estructura principal debe permitir el soporte de los componentes electrónicos y mecánicos y su unión a este por medio de elementos de conexión. Además, el diseño para su uso por buzo debe incluir elementos que permitan la sujeción del sistema para su manipulación y movimiento. Finalmente, el diseño debe contemplar acoples para su ensamble con ROV cuando se requiera este modo de operación.

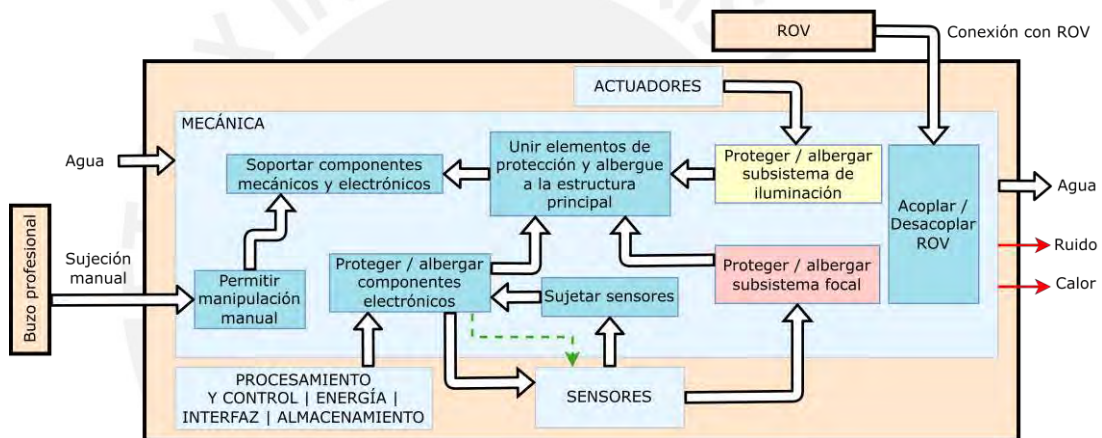









Figura A.31: Dominio mecánico (Fuente: Elaboración propia).











A.4.4 Matriz morfológica – portadores de solución


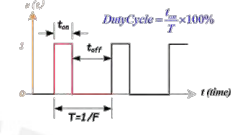

◆ Solución 1












◆ Solución 2













◆ Solución 3









Dominios: Procesamiento y control			
Funciones	Soluciones		
	Hardware		
	1	2	3
Procesar información e indicaciones	 Microcontrolador	 Procesador de Placa Única (SBC) para propósito	 Procesador de Placa Única (SBC) optimizada para manejo y procesamiento gráfico
Obtener imagen del ambiente submarino			
Estimar posición y orientación relativa			
Obtener profundidad de sumersión			
Calcular nivel de batería			
Calcular luminosidad del imagen		◆	◆ ◆
Controlar indicadores luminosos	 Driver para LEDs	 Uso de puertos del microcontrolador y componentes electrónicos	
	◆	◆ ◆	
Desconectar fuente de alimentación	 Interrupción por circuitos de almacenamiento de estados	 Circuitos de apagado permanente	
	◆ ◆	◆	













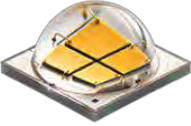
Dominios: Procesamiento y control			
Funciones	Soluciones		
	Software		
	1	2	3
Procesar información e indicaciones	 Uso de interrupciones y lógica booleana	 Uso de interrupciones e identificación de conexión	
	◆	◆ ◆	
Obtener imagen del ambiente submarino	 Procesamiento de imagen en calidad real	 Procesamiento de imagen en calidad reducida	
	◆ ◆	◆	
Estimar posición y orientación relativa	 Cálculo del tiempo de viaje de la onda sonora	 Navegación por estima	 Odometría visual
	◆	◆	◆
Obtener profundidad de sumersión	$P = \rho gh$ Cálculo de acuerdo a la presión de trabajo		
	◆ ◆ ◆		
Calcular nivel de batería	 Estimación de acuerdo a la lectura de voltaje		
	◆ ◆ ◆		
Calcular luminosidad del imagen	 Uso de histograma de luminosidad de píxeles	$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n x_k$ Promedio de luminosidad de píxeles	 Conteo de píxeles en imagen binarizada por un umbral
	◆	◆	◆












Dominios: Procesamiento y control			
Funciones	Soluciones		
	Software		
	1	2	3
Calcular intensidad luminosa requerida	$\bar{I} = k_i(I) + k_p(P)$	$\bar{I} = F(I, P)$	
	◆	◆ ◆	
Controlar indicadores luminosos	 Apagado y encendido directo	 Control con PWM	
	◆ ◆	◆	
Desconectar fuente de alimentación	 Lógica booleana		
	◆ ◆ ◆		

Dominio: Sensores			
Funciones	Soluciones		
	1	2	3
Sensor imagen	 Uso de múltiples cámaras no sumergibles  	 Uso de una cámara sumergible	 Uso de múltiples cámaras sumergibles 
	 USBL 	 Cámara 	 Unidad de medición inercial de 6 ejes 
Sensor orientación	 Giroscopio de 3 ejes 	 Unidad de medición inercial de 6 ejes 	 Giroscopio de 6 ejes 
	 Sensor de presión para aplicaciones submarinas   		
Sensor voltaje de batería	 Convertidor analógico-digital   		
	 Sensor de fuga   		

Dominio: Mecánico			
Funciones	Soluciones		
	1	2	3
Permitir manipulación manual	 Tubo de material resistente a la corrosión	 Manubrio comercial	 Manija trabricada por manufactura aditiva
	◆	◆	◆
Sujetar sensores	 Sujeción mediante uniones atornilladas a bandeja de un solo nivel	 Sujeción mediante uniones atornilladas a estructura multinivel	 Sujeción por forma en estructura cilíndrica
	◆ ◆	◆	
Proteger y albergar componentes electrónicos	 Enclosure cilíndrico	 Contenedor cuadrado	
	◆ ◆ ◆		
Proteger y albergar subsistema de iluminación	 Protección incorporada para luces submarinas	 Enclosure cilíndrico con puerto plano	
	◆ ◆	◆	
Proteger y albergar subsistema focal	 Protección incorporada para cámaras submarinas	 Enclosure cilíndrico con puerto tipo domo	
	◆	◆ ◆	

Dominio: Mecánico			
Funciones	Soluciones		
	1	2	3
Unir contenedores a estructura principal	 Unión por medio de planchas dobladas	 Unión atornillada usando elementos de conexión impresos en 3D	
	◆	◆ ◆	
Soportar componentes mecánicos y electrónicos	 Estructura hecha de perfiles estructurales	 Estructura compuesta por planchas dobladas	 Estructura impresa en 3D
	◆	◆	◆
Acoplar / desacoplar ROV	 Unión directa por tornillos	 Acople por plancha con uniones atornilladas	 Acople por uniones atornilladas y elementos impresos en 3D
	◆	◆	◆

Dominios: Energía, actuadores, interfaz y almacenamiento					
Funciones		Soluciones			
		1	2	3	
Energía	Almacenar energía				
	Energizar actuadores	Batería de polímero de iones de litio ◆	Batería de ion de litio ◆ ◆	Batería de Niquel-Cadmio	
	Activar alimentación eléctrica				
	Acondicionar voltaje de alimentación	Switch submarino ◆ ◆	Pulsador submarino ◆		
	Energizar procesadores				
	Energizar sensores	Reductor de voltaje ◆ ◆	Elevador de voltaje ◆	Circuito lineal integrado	
	Permitir paso de energía				
		Interruptor electromagnético ◆ ◆ ◆			
	Actuadores	Acondicionar señal para iluminación requerida			
			Driver incorporado ◆ ◆	Driver para LEDs ◆	
Iluminar entorno					
		Luces submarinas ◆ ◆	Arreglo de LEDs ◆		

Dominios: Energía, actuadores, interfaz y almacenamiento				
Funciones		Soluciones		
		1	2	3
Interfaz	Ingresar instrucción	 Pulsador submarino	 Switch submarino	
		◆	◆ ◆	
	Ingresar modo de operación	 Indicación mediante la conexión alámbrica con el ROV	 Switch submarino	
		◆ ◆	◆	
	Mostrar información del entorno	 Pantalla LCD con conexión mini HDMI + Indicadores submarinos	 Pantalla TFT-LCD + Indicadores submarinos	
	Mostrar información del sistema			
Mostrar estado de energía	◆			◆ ◆
Almacenamiento	Generar registro de datos	 Microcontrolador	 Procesador de Placa Única (SBC) para propósito general	 Procesador de Placa Única (SBC) optimizada para manejo y procesamiento gráfico
			◆	◆ ◆
	Registrar datos	 Memoria micro SD	 Memoria externa	
		◆	◆ ◆	

A.4.5 Conceptos de solución

En esta sección se presentarán los conceptos de solución generados a partir de la matriz morfológica presentada. El planteamiento de cada propuesta de solución busca cubrir todos los requerimientos del sistema y cumplir las funciones a través de los portadores de solución.

Características generales

En general, para los contenedores de geometría cilíndrica de los conceptos de solución se propone el uso de materiales utilizados en aplicaciones submarinas debido a sus propiedades características. Así, para la manufactura de los contenedores cilíndricos (*enclosure*) se propone el uso de un torno para realizar operaciones de cilindrado y mandrilado con el fin de obtener las dimensiones requeridas del diseño.

En este sentido, se propone el uso de un único contenedor, al cual se le denominará *enclosure* principal, encargado de proteger y albergar los sensores, componente de almacenamiento, controlador y elemento de alimentación; por ello, debido a que se utilizará un único elemento mecánico para esta función, es necesario diseñar una eficiente distribución de los componentes en el *enclosure* principal. Por otra parte, para el albergue y protección de los sensores focales de las soluciones que implican el uso de cámaras no sumergibles, se propone el uso de contenedores cilíndricos, a los cuales se les denominará *enclosures* secundarios, con puertos tipo domo debido a sus ventajas descritas en el marco teórico de la tesis. Estos *enclosures* estarán conectados de forma alámbrica al *enclosure* principal para su control. Por otro lado, debido a que el sistema debe permitir un montaje de forma modular, como se mencionó en los requerimientos del sistema, se propone que las conexiones entre los elementos mecánicos requeridos de todas las soluciones sean mediante uniones atornilladas, esto con el fin de facilitar su montaje y desmontaje.

Así, como se precisaron en secciones anteriores, el sistema debe permitir su acople con un ROV para su manejo remotamente. Por ello, se propone que la sección de acople entre los elementos mecánicos que permiten la sujeción del buzo, sea la misma en donde se conectarán los elementos de ensamble que permiten la unión con el ROV. Finalmente, para todas las soluciones propuestas, se utiliza una distribución de luces de disposición cuadrada que permita proveer luz homogéneamente en la zona de toma de imágenes; esta distribución es comúnmente utilizada en los sistemas comerciales y proyectos de investigación consultados.

Concepto de solución 1

En la figura A.32 se puede apreciar el primer concepto de solución planteado. Este concepto busca proponer un sistema de bajo presupuesto. Por ello, se proponen artículos comerciales de mayor accesibilidad al usar un sistema de iluminación comercial y únicamente dos cámaras submarinas. Este concepto propone el uso de algoritmos de navegación por estima empleando un IMU con el fin de reducir el costo de adquisición de artículos sofisticados como lo son los sistemas submarinos de posicionamiento acústico (véase USBL, SBL y LBL, ver marco teórico). Así, para mejorar la precisión en la estimación de posición, se utilizará un sensor de presión para estimar la profundidad de sumersión en tiempo real. El *enclosure* principal se sitúa al centro y se deja libre un espacio entre la cara oculta de este y la pared delantera con la finalidad de permitir la distribución y arreglo de conexiones alámbricas a todos los elementos necesarios.

Como se observa en la estructura de unión, las cámaras están posicionadas de forma equidistante al *enclosure* principal, mientras que este último está posicionado de forma que se conecte con la estructura principal a través de elementos de conexión impresos en 3D y uniones atornilladas. Por otra parte, su extremo protegido por un aislante transparente permite ver la pantalla de visualización de información, la cual es visible por el buzo cuando esté sujeto al sistema a través de los sujetadores desde la parte posterior.

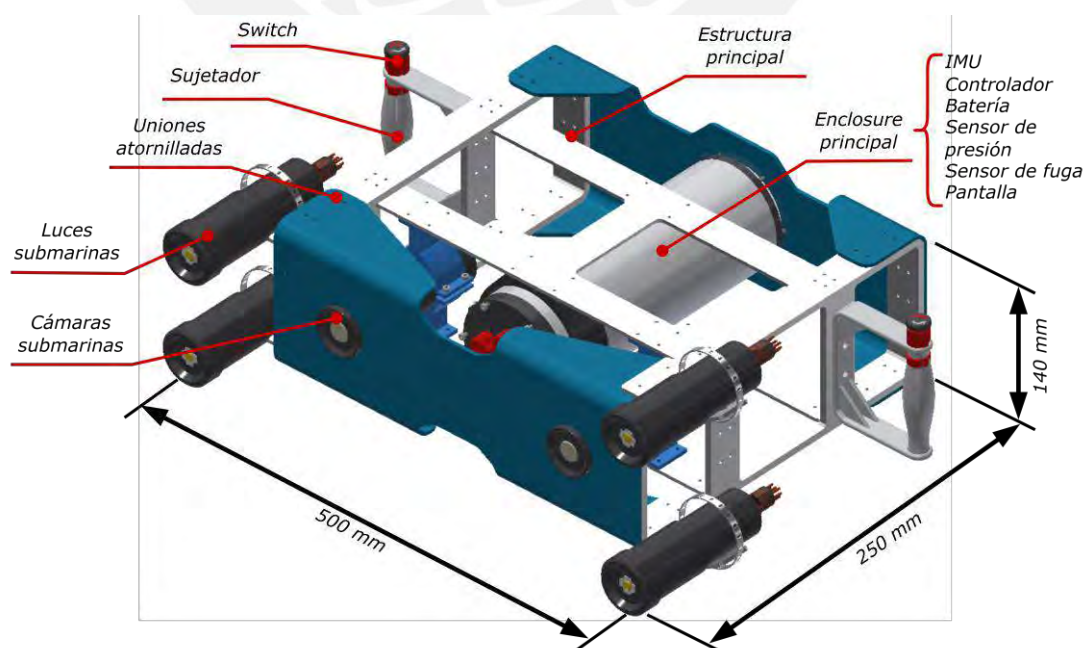


Figura A.32: Concepto de solución 1 (Fuente: Elaboración propia).

En la figura A.33 se puede apreciar la distribución de componentes en el *enclosure* principal, entre los cuales se encuentran el controlador y los sensores necesarios. La bandeja utilizada para sostener los elementos es de un único nivel, similar a los sistemas encontrados en la literatura. Por otra parte, se propone el uso de un compartimiento especial para la batería. La pantalla está situada en la parte posterior del *enclosure* que posee un sello transparente.

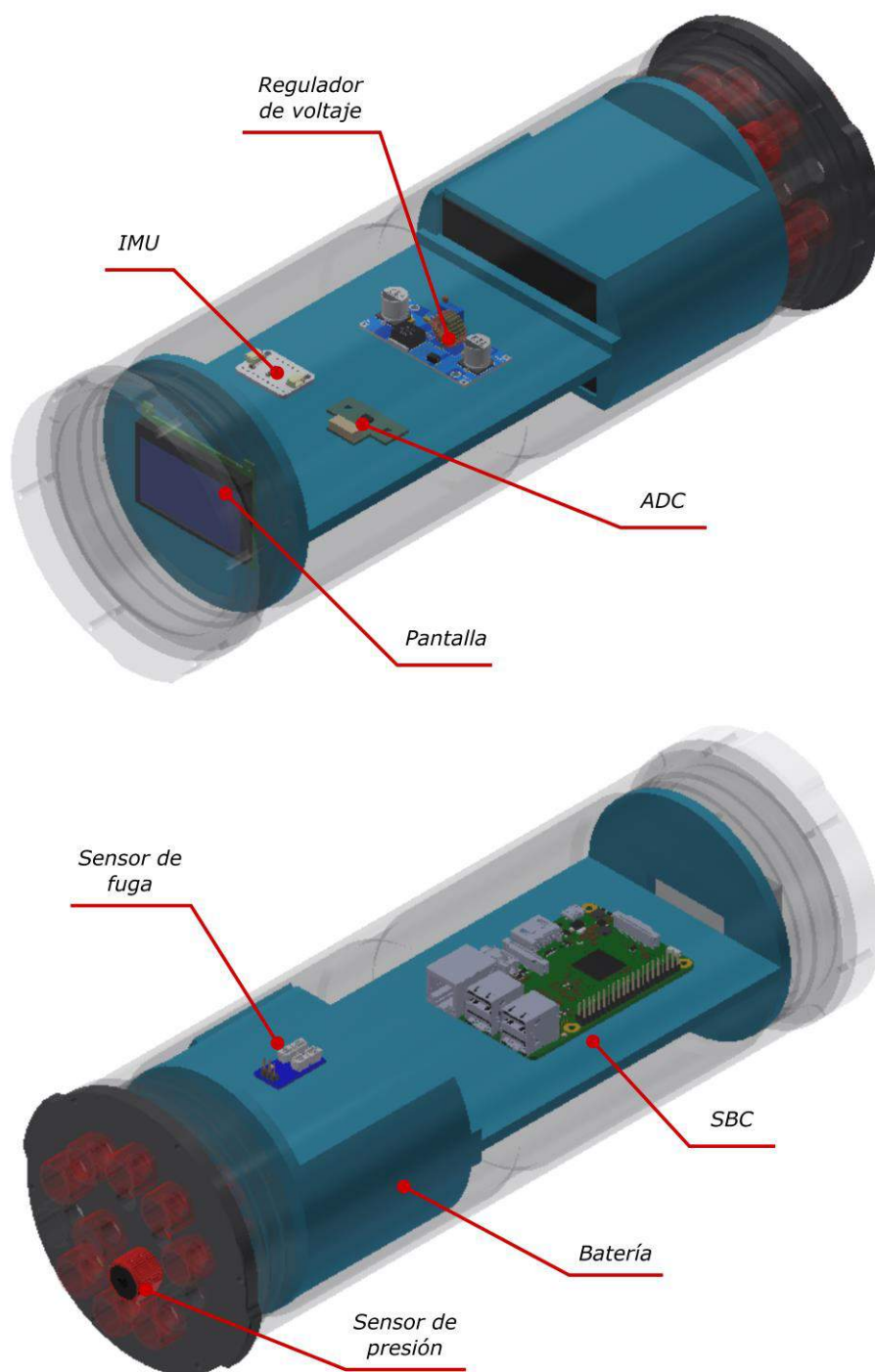


Figura A.33: Distribución de componentes del concepto de solución 1 (Fuente: Elaboración propia).

Finalmente, se propone el uso de conexiones mediante uniones atornilladas entre la estructura principal del sistema y la estructura exterior del ROV cuando este último lo esté controlando, esto se puede apreciar en la figura A.34. Para ello, es necesario que el ROV utilizado posea una estructura que permita su ensamble a la estructura principal del sistema.

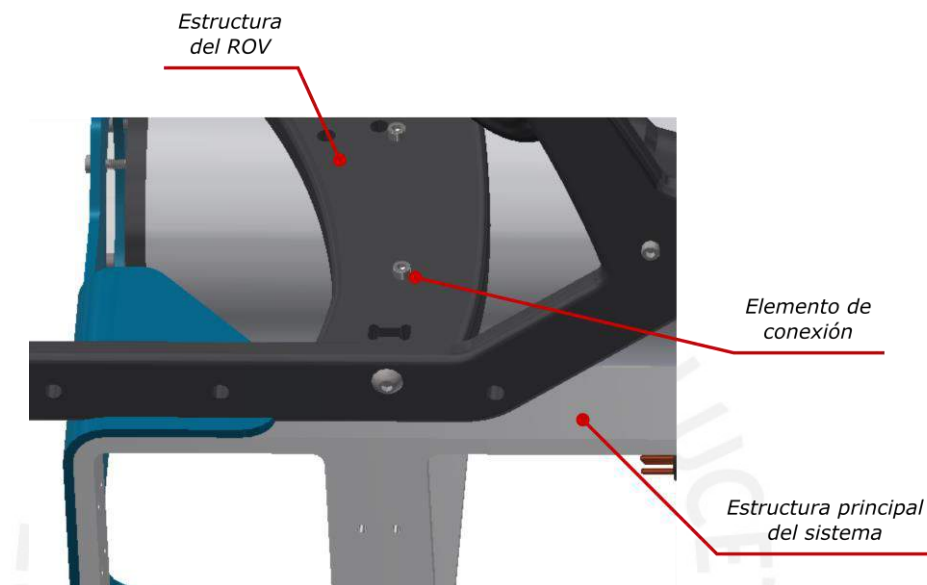


Figura A.34: Conexión entre ROV y sistema para el concepto de solución 1
(Fuente: Elaboración propia).

Concepto de solución 2

En la figura A.35 se puede apreciar el segundo concepto de solución planteado. Este sistema propone el uso de tecnologías especializadas para aplicaciones submarinas, como el uso de un USBL para la estimación de la posición, y el uso de componentes de bajo costo y de fácil adquisición en el mercado peruano como los perfiles utilizados en la estructura de soporte. Como se observa, se distribuyen las tres cámaras de manera equidistante y estas están unidas a la estructura principal por medio de piezas impresas en 3D. Por otro lado, se observa que el *enclosure* principal se posiciona en la parte superior de la estructura en la parte central, esto para distribuir el peso equitativamente hacia todo el sistema de perfiles conectados. La parte que permite visualizar la pantalla al interior del *enclosure* en donde se encontrará el visualizador de información se orienta hacia la cara posterior. Los sujetadores que permiten la sujeción del buzo, los elementos de sostén y conexión de las luces submarinas, y demás elementos con geometría compleja adicionales para el ensamble son fabricados por medio de manufactura aditiva para simplificar el proceso de fabricación.

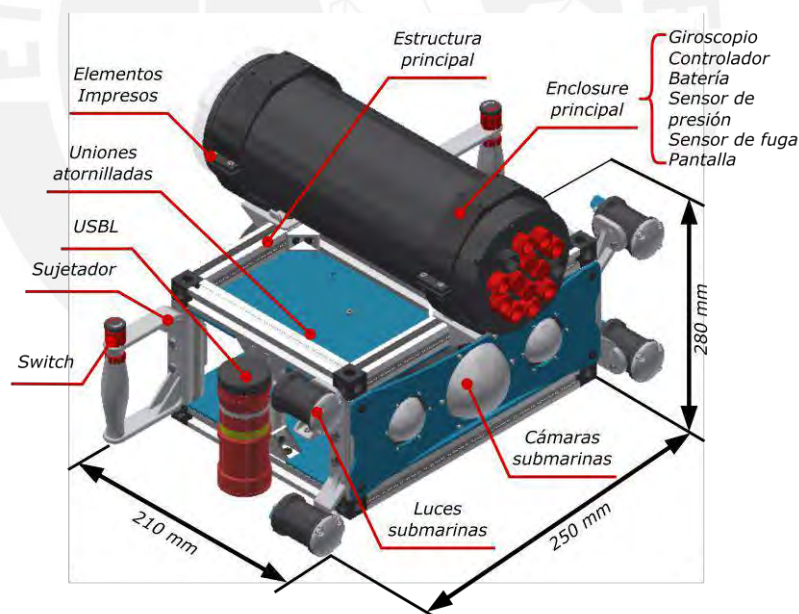


Figura A.35: Concepto de solución 2 (Fuente: Elaboración propia).

Por otra parte, en la figura A.36 se puede observar la distribución de los componentes eléctricos y electrónicos en el *enclosure* principal. Esta distribución es similar a la del concepto de solución 1. En este sentido, se tiene una bandeja de un solo nivel y un compartimiento especial para la batería.

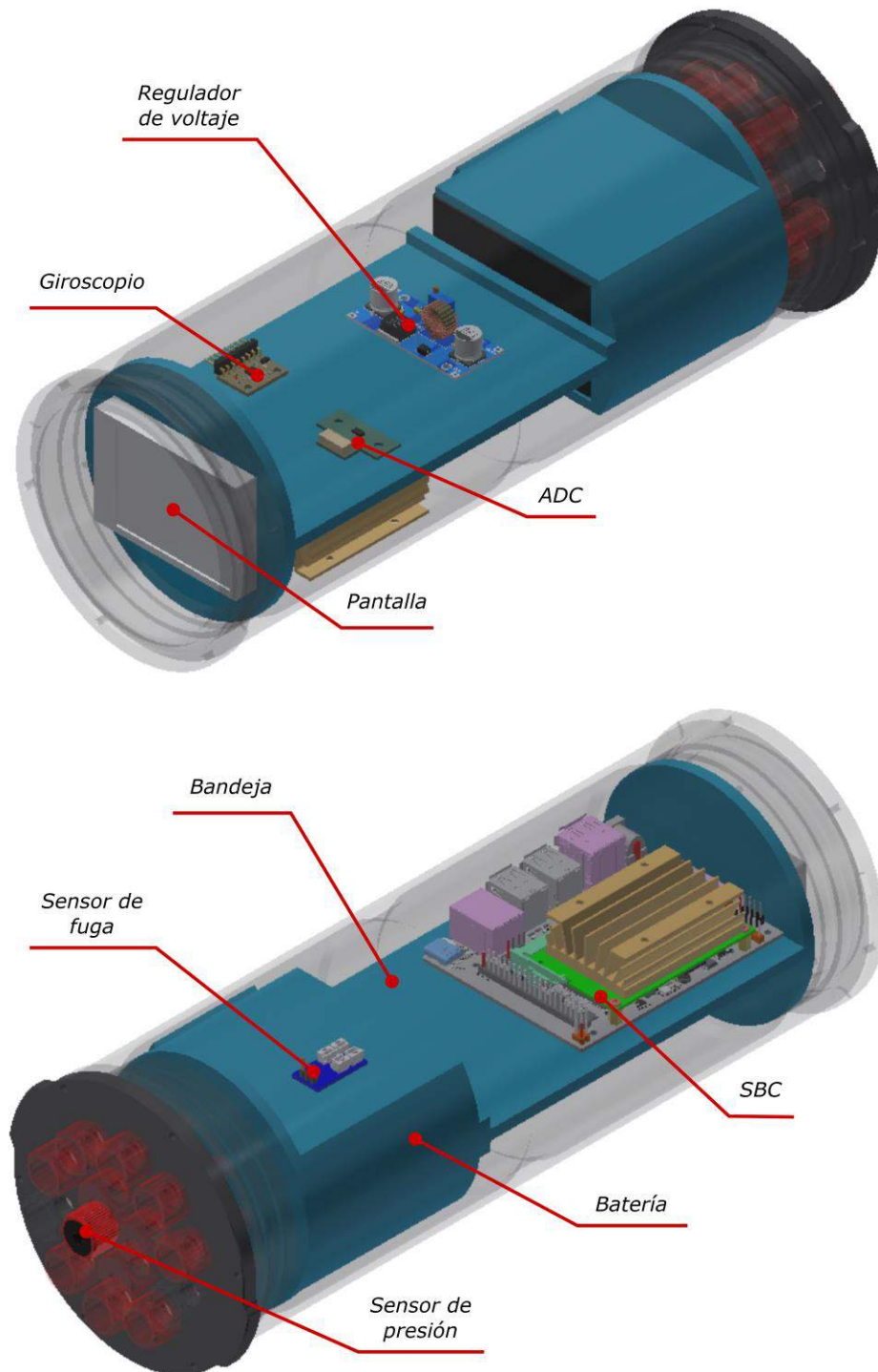


Figura A.36: Distribución de componentes del concepto de solución 2
(Fuente: Elaboración propia).

Finalmente, se propone el uso de elementos conectores fabricados por manufactura aditiva para ensamblar el sistema y el ROV. La geometría de este tipo de elementos puede ser observada en la figura A.37.

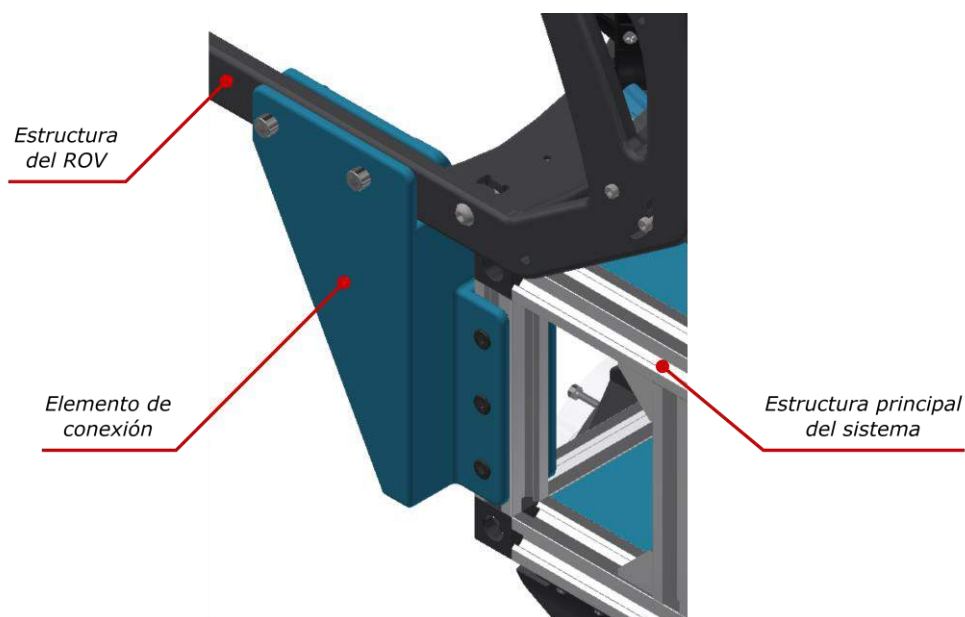


Figura A.37: Conexión entre ROV y sistema para el concepto de solución 2

(Fuente: Elaboración propia).

Concepto de solución 3

En la figura A.38 se puede apreciar el tercer concepto de solución planteado. Esta propuesta plantea el uso de tecnologías especializadas, enfocándose en el desempeño técnico del sistema. En primera instancia se propone el diseño de un sistema de iluminación compuesto por LEDs de alta intensidad y contenedores para su protección (*enclosures*). Por otra parte, se utiliza una plancha doblada para conectar el *enclosure* principal con la estructura de soporte. A su vez, se utilizan tres cámaras separadas con misma distancia base, y están protegidas por los *enclosures* secundarios. Se plantea el uso de la odometría visual para estimar la posición del sistema en cada instante del tiempo, en conjunto con un giroscopio para obtener información de la orientación relativa. Así, al igual que las otras soluciones, el *enclosure* principal estará orientado de tal forma que se permita la visualización de la información por medio de la pantalla. Finalmente, se propone el uso de un manubrio comercial para la manipulación del sistema en el entorno submarino.

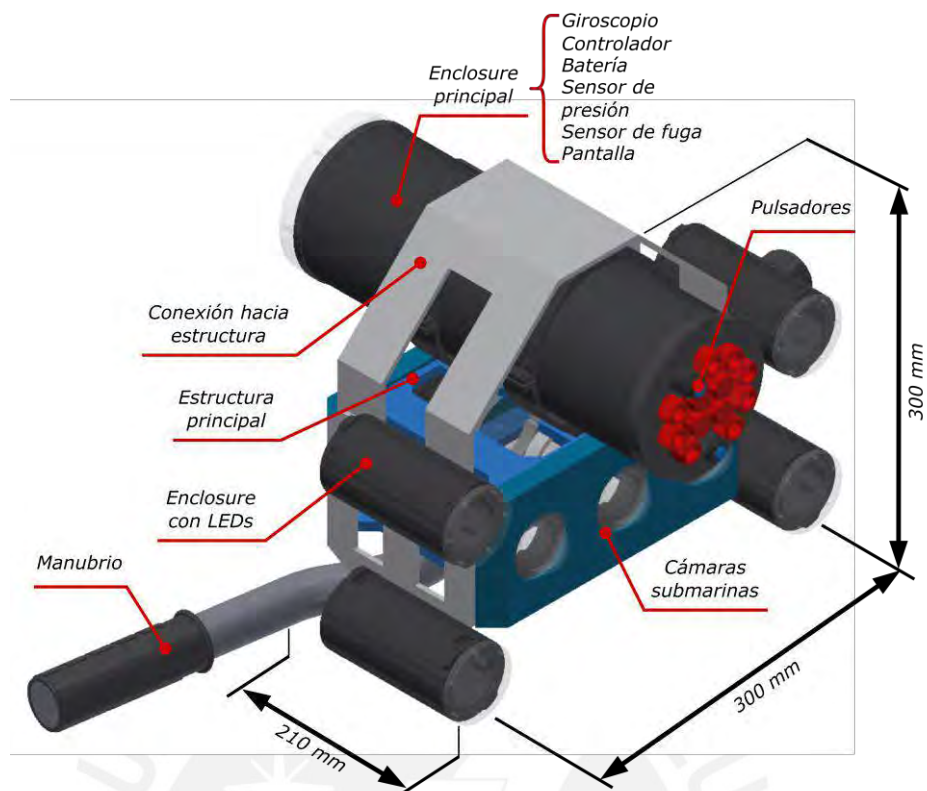


Figura A.38: Concepto de solución 3 (Fuente: Elaboración propia).

A diferencia de los conceptos de solución 1 y 2, se propone el uso de una bandeja multinivel para sostener los diferentes componentes electrónicos. Esta distribución puede ser analizada en la figura A.39.

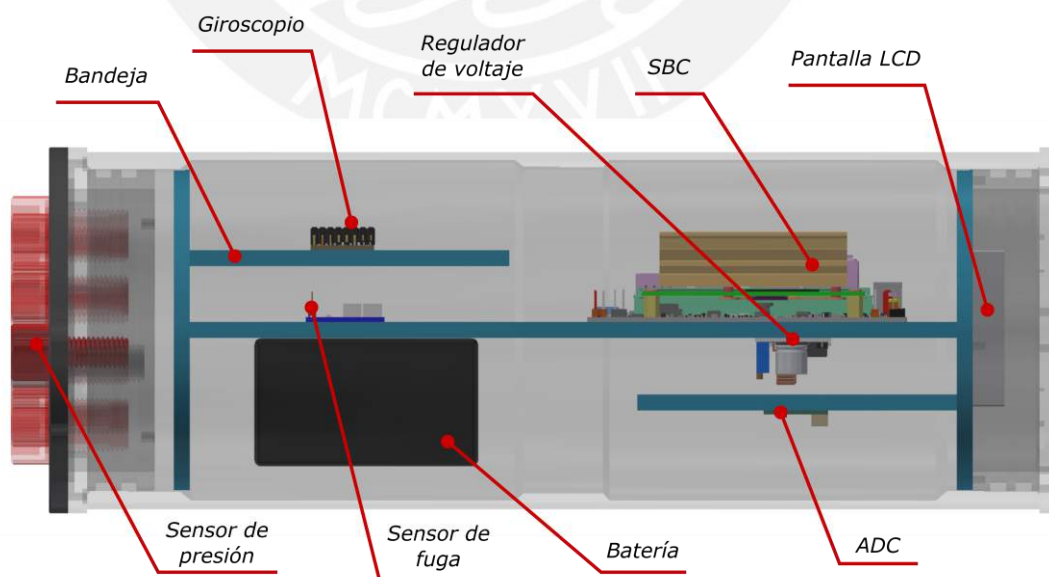


Figura A.39: Distribución de componentes del concepto de solución 3 (Fuente: Elaboración propia).

Finalmente, se propone el uso de planchas de aluminio para la conexión entre el sistema y el ROV para este modo de operación, donde se utilizarán uniones atornilladas para conectar este elemento con las estructuras principales de ambos sistemas; esto se puede ver ejemplificado en la figura A.40.

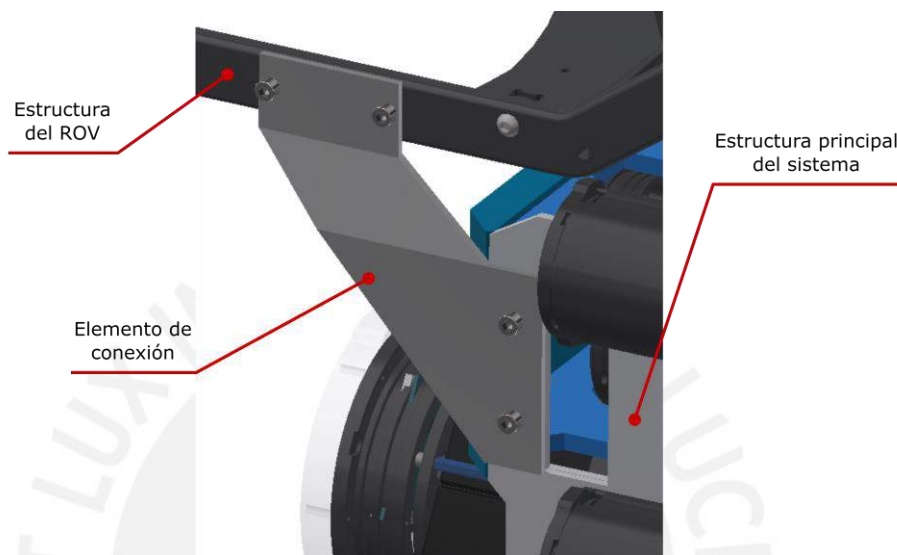


Figura A.40: Conexión entre ROV y sistema para el concepto de solución 3
(Fuente: Elaboración propia).

A.4.6 Análisis técnico-económico

De acuerdo con la metodología planteada en el capítulo 1 de la presente tesis, es necesario evaluar las distintas soluciones propuestas por medio de criterios técnicos y económicos. Así, por cada criterio se le asigna un puntaje “p” a cada solución que puede ir de 0 a 4 donde 0 representa una solución que no satisface el criterio, y 4 representa una propuesta la cual su rendimiento ante el criterio en análisis es ideal. Por otra parte, se le asigna un peso “g” a cada criterio de acuerdo a su importancia en el diseño del sistema propuesto. A continuación, se presenta la descripción de los criterios técnicos, justificación de pesos “g” y puntajes “p” por cada concepto de solución.

- **Calidad de imágenes adquiridas:** Indica en qué proporción las imágenes que serán sensadas por cada concepto de solución presentan rendimiento alto con respecto a la resolución y respuesta en ambientes con baja luminosidad. A este criterio se le asigna un peso de 5 ya que es importante adquirir imágenes de alta calidad para la generación posterior de *tours* virtuales. Se le asigna un puntaje de

1 al concepto 1 debido a que generalmente las cámaras submarinas no poseen alta resolución; se le asigna un puntaje de 2 al concepto 2 ya que es posible utilizar cámaras con alta resolución; se le asigna un puntaje de 3 al concepto 3 debido a que se pueden utilizar cámaras de alta resolución y es posible diseñar emisores de luz de alta luminosidad.

- **Tamaño:** Indica una valoración con respecto al tamaño propuesto por cada concepto de solución. A este criterio se le asigna un peso de 3 debido a su importancia en su uso por buzo. Se le asigna un puntaje de 3 a los dos conceptos de solución ya que presentan dimensiones reducidas, y un puntaje de 2 al tercer concepto ya que el uso de elementos mecánicos adicionales aumentará el tamaño y el peso.
- **Capacidad de procesamiento:** Enfocado al controlador, valora la capacidad de procesamiento para determinar la iluminación de la imágenes y estimación de posición. A este criterio se le asigna un peso de 4 ya que es importante la capacidad de adquisición de imagen simultáneas y estimación de posición y orientación. Se le asigna un puntaje de 2 al concepto 1 debido a que la capacidad de procesamiento de un SBC de propósito general no es elevada; se le asigna un puntaje de 3 a los conceptos 2 y 3 debido a que la capacidad de un equipo más especializado es superior a la del presentado anteriormente.
- **Eficiencia energética:** Indica en qué medida se utiliza eficientemente la energía eléctrica proporcionada por el componente de alimentación. A este criterio se le asigna un peso de 2 ya que el sistema trabajará en periodos cortos de tiempo, por lo que no es de importancia una elevada eficiencia energética. Se le asigna un puntaje de 3 a los conceptos 1 y 2 debido a que las pérdidas energéticas son reducidas debido al uso de luces submarinas de alto rendimiento; se le asigna un puntaje de 2 al concepto 3 debido a que es posible que se generen pérdidas en la alimentación del subsistema iluminación diseñado.
- **Precisión en la estimación de posición y orientación:** Indica la precisión del método de estimación propuesto por cada concepto de solución. A este criterio se le asigna un peso de 5 ya que es importante una georreferenciación precisa de las imágenes. Se le asigna un puntaje de 2 al concepto 1 debido a que el error es elevado en el uso de la navegación por estima en periodos largos de tiempo; se le asigna un puntaje de 2 al concepto 2 ya que el error aumenta de acuerdo a la

distancia en la utilización de un USBL; se le asigna un puntaje de 3 al concepto 3 debido a que el uso de odometría visual presenta alta precisión en conjunto con otros sensores como giroscopios y sensor de presión para determinar la profundidad de sumersión.

- **Seguridad:** Valora la seguridad del sistema propuesto con respecto al riesgo de ingreso de agua a los *enclosures*, el fallo de los componentes de unión y el desgaste prematuro de otros elementos utilizados. A este criterio se le asigna un peso de 4 debido a que es importante aislar los componentes electrónicos del ambiente submarino. Se le asigna un puntaje 3 a los conceptos 2 y 3 debido a que los elementos comerciales propuestos presentan seguridad elevada; se le asigna un puntaje de 2 al concepto 3 debido a que el uso de un mayor número de *enclosures* implica un mayor riesgo al ingreso de agua.
- **Ergonomía:** Valora la comodidad de uso del dispositivo por una persona. A este criterio se le asigna un peso de 2 ya que el tiempo de manejo del sistema en su uso por buzo no es elevado. Se le asigna un puntaje de 1 al concepto 1 debido a que el grado de ergonomía no es elevado en los tubos utilizados en los sujetadores; se le asigna un puntaje de 2 al concepto 2 ya que es posible utilizar fabricar sujetadores ergonómicos por medio de manufactura aditiva; se le asigna un puntaje de 3 al concepto 3 debido a que el uso de un manubrio comercial asegura una sujeción ergonómica por parte del buzo.

Por otra parte, los criterios económicos utilizados son los siguientes:

- **Adquisición de materiales:** Indica una valoración ante la facilidad de adquirir los materiales para su fabricación en el mercado local. A este criterio se le asigna un peso de 4 debido a que es importante utilizar materiales accesibles y reducir los costos involucrados. Se le asigna un puntaje de 3 a los conceptos 1 y 2 debido a que se utilizan productos accesibles en el mercado local como planchas metálicas y perfiles estructurales; se le asigna un puntaje de 2 al concepto 4 debido a que se necesitan componentes electrónicos difíciles de adquirir localmente, por ello su costo aumenta en su importación.
- **Costo de tecnología:** Se califica positivamente las soluciones que involucren el uso de componentes electrónicos de bajo costo. A este criterio se le asigna un peso de 4 debido a que el costo de equipos especializados influye significativamente en el presupuesto total. Se le asigna un puntaje de 3 al concepto 1 ya que se propone

el uso de componentes de relativo bajo costo; se le asigna un puntaje de 2 a los conceptos 2 y 3 debido a que se utilizan productos de mayor costo e implican un diseño elaborado en los subsistemas de iluminación y focal.

- **Costo de fabricación y montaje:** Valora el costo involucrado en los procesos de manufactura de los elementos necesarios y el montaje de todas las partes. A este criterio se le asigna un peso de 3 debido a que la fabricación de elementos con alto grado de tolerancia y la complejidad de ensamble aumentan el costo. Se le asigna un puntaje de 3 a los conceptos 1 y 2 debido a que no se requiere de procesos de fabricación sofisticados y poseen menor número de piezas, lo que facilita el ensamble; se le asigna un puntaje de 2 al concepto 3 debido a que es requerido procesos de fabricación de mayor complejidad y posee mayor número de piezas.
- **Facilidad de mantenimiento:** Valora la sencillez en el proceso de mantenimiento tomando en cuenta el desgaste de los componentes para su reemplazo, el aseguramiento de uniones atornilladas y revisión de componentes electrónicos. A este criterio se le asigna un peso de 3 debido a que es importante un mantenimiento que asegure que la seguridad y funcionamiento del sistema no serán comprometidos. Se le asigna un puntaje de 3 al concepto 1 debido a que presenta menor número de componentes mecánicos y electrónicos, lo que implica menor costo en su reemplazo; se le asigna un puntaje de 2 a los conceptos 2 y 3 debido a su mayor número de componentes mecánicos, elementos de conexión y elementos fabricados por manufactura aditiva, lo que implica un mayor costo en su reemplazo.
- **Costo de energía:** Se valora positivamente las propuestas que no involucran un gasto excesivo de energía en el tiempo y por ende su costo involucrado. A este criterio se le asigna un peso de 2 debido a que el funcionamiento del sistema será en periodos cortos de tiempo, por lo que no se requerirá de una potencia elevada y por ende bajo costo. Se le asigna un puntaje de 3 a los conceptos 1 y 2 debido al uso de componentes de alto rendimiento, por lo que no se necesitará de alta energía eléctrica; se le asigna un puntaje de 2 al concepto 3 debido a que será necesario el uso de mayor energía para el subsistema de iluminación deseado.

En las tablas A.2 y A.3 se muestran las evaluaciones técnica y económica de cada propuesta de solución.

Tabla A.2: Evaluación técnica de los conceptos de solución (Fuente: Elaboración propia).

Técnico										
Soluciones			Solución 1		Solución 2		Solución 3		Solución Ideal	
N°	Criterio	g	p	g*p	p	g*p	p	g*p	p	g*p
1	Calidad de imágenes adquiridas	5	1	5	2	10	3	15	4	20
2	Tamaño	3	3	9	3	9	2	6	4	12
3	Capacidad de procesamiento	4	2	8	3	12	3	12	4	16
4	Eficiencia energética	2	3	6	3	6	2	4	4	8
5	Precisión en estimación de posición y orientación	5	2	10	2	10	3	15	4	20
6	Seguridad	4	3	12	3	12	2	8	4	16
7	Ergonomía	2	1	2	2	4	3	6	4	8
Total		-	-	52	-	63	-	66	-	100
Valor técnico		-	-	0,52	-	0,63	-	0,66	-	1

Tabla A.3: Evaluación económica de los conceptos de solución (Fuente: Elaboración propia).

Económico										
Soluciones			Solución 1		Solución 2		Solución 3		Solución Ideal	
N°	Criterio	g	p	g*p	p	g*p	p	g*p	p	g*p
1	Adquisición de materiales	4	3	12	3	12	2	8	4	16
2	Costo de tecnología (Electrónica)	4	3	12	2	8	2	8	4	16
3	Costo de fabricación y montaje	3	3	9	3	9	2	6	4	12
4	Facilidad de mantenimiento	3	3	9	2	6	2	6	4	12
5	Costo de energía	2	3	6	3	6	2	4	4	8
Total		-	-	48	-	41	-	32	-	64
Valor económico		-	-	0,75	-	0,64	-	0,50	-	1

Así, tomando los resultados de las tablas anteriores, se puede plantear la evaluación técnico-económica que permite determinar el concepto de solución óptimo. En la figura A.41 se muestra el gráfico de evaluación de las tres soluciones planteadas, donde se puede observar que el primer concepto de solución muestra un elevado desempeño económico y el tercer concepto de solución muestra un elevado desempeño técnico. El segundo concepto de solución se acerca en mayor medida a la solución ideal, y presenta un desempeño técnico cercano al del tercer concepto de solución. Por ello, se tomará al segundo concepto de solución como base para el desarrollo del diseño mecatrónico. Finalmente, se observa que el rendimiento económico del primer concepto es superior al del segundo; entonces, se propone el uso de la navegación por estima (utilizado en la primera propuesta) como método de estimación de posición en la implementación del prototipo del sistema.

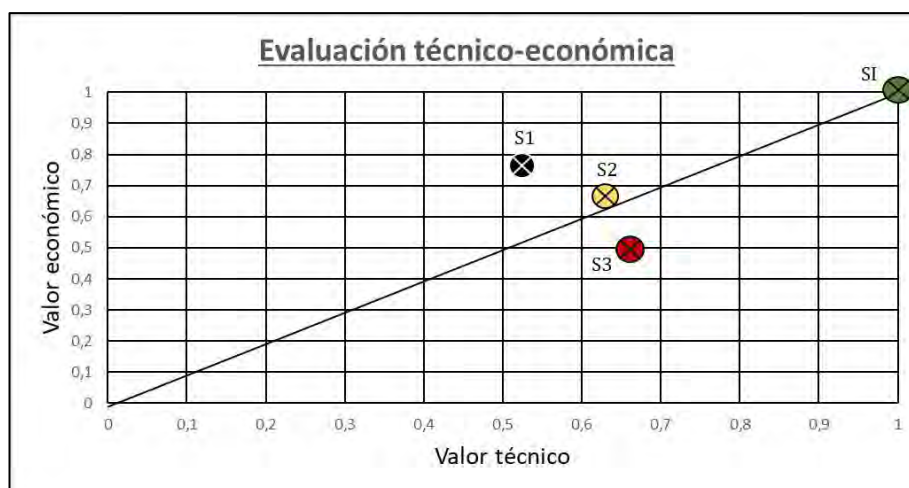


Figura A.41: Gráfica de los resultados por la evaluación técnico-económica

(Fuente: Elaboración propia).

A.4.7 Diagramas de flujo

En la figura A.42 se presenta el diagrama de operaciones en el modo de uso por buzo que contiene las acciones que debe realizar el operario para manejar el sistema correctamente. Se inicia con el ingreso de la batería previamente cargada hacia el interior del *enclosure* principal. Luego, se coloca la memoria y, si es necesario, se ingresan los parámetros de operación con el sistema activado por medio de los *switches* de energización, y se sellan los *enclosures* principal y secundarios. Posterior a la sumersión del buzo o ROV con el sistema, se debe activar la adquisición y registro de imágenes georreferenciadas para obtener información del entorno submarino. Durante este proceso, si ocurre un accidente o existe un ingreso de agua al *enclosure* principal, se debe desactivar la alimentación de los sensores, controlador y actuadores para regresar a la superficie. Por otro lado, si se logra adquirir correctamente los datos, el operario debe regresar a la superficie para desactivar la alimentación del sistema, recargar la batería y retirar la memoria en la cual se han almacenado las imágenes georreferenciadas.

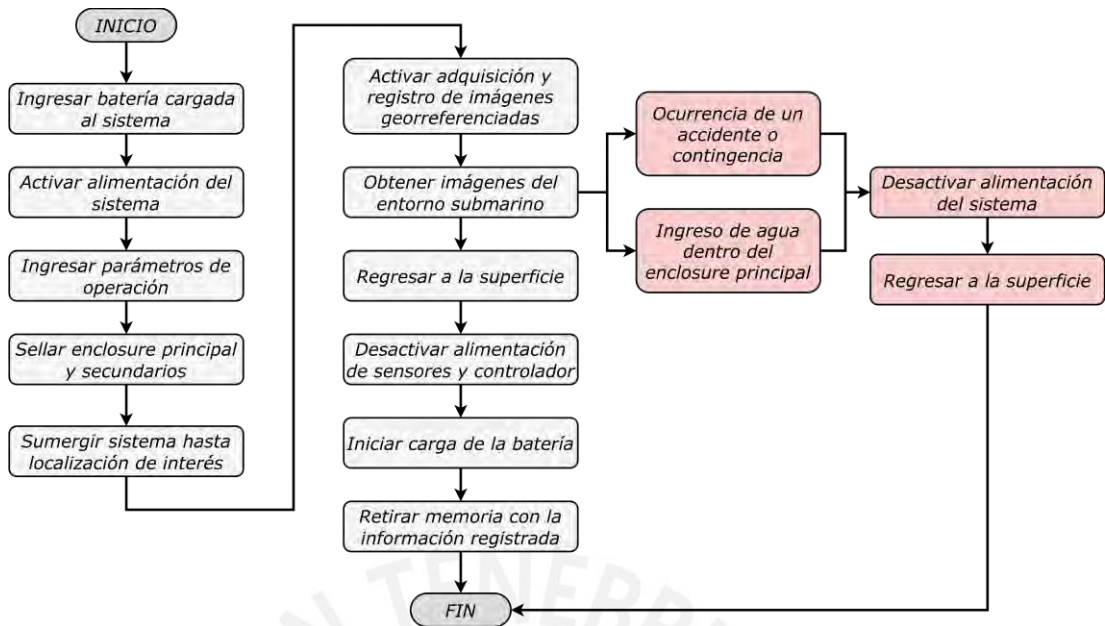


Figura A.42: Diagrama de operaciones en modo de uso por buzo (Fuente: Elaboración propia).

Por otra parte, en la figura A.43 se presenta el diagrama de operaciones en el modo de uso por ROV. En esta secuencia, el ROV es el encargado de transportar al sistema y controlar el registro de las imágenes georreferenciadas en la zona submarina de interés. Cabe aclarar que el ROV será manejado por un operario desde una estación en la superficie y que este suministrará alimentación a las luces submarinas, como se especificó en la lista de requerimientos.

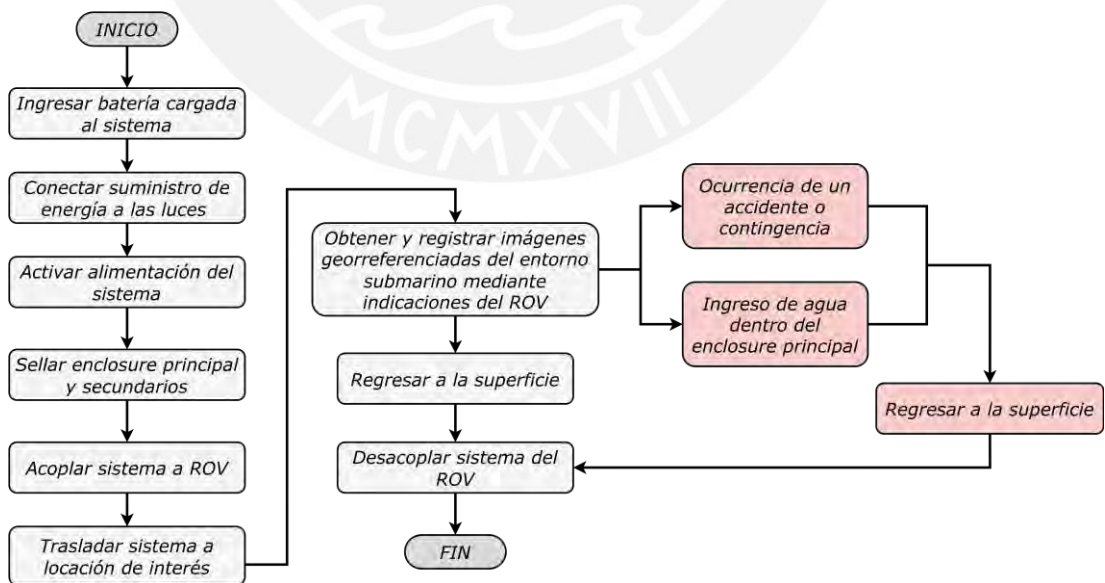


Figura A.43: Diagrama de operaciones en modo de uso por ROV (Fuente: Elaboración propia).

ANEXO B: Memoria de cálculo

B.1. Cálculo de las dimensiones de la estructura de soporte.

Las dimensiones a determinar se muestran en la figura B.1.

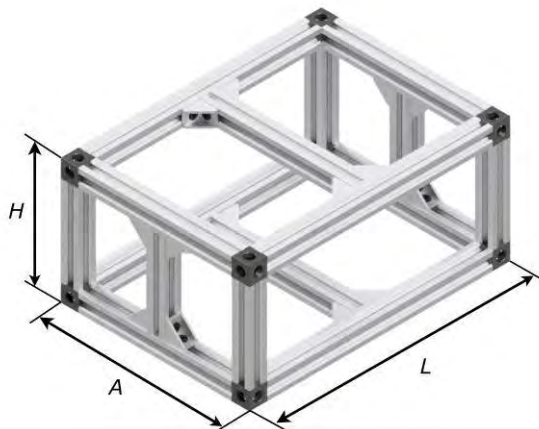


Figura B.1: Dimensiones de la estructura de soporte (Fuente: Elaboración propia).

Para reducir la longitud H al mínimo se debe tener en consideración las restricciones de fabricación. En este sentido, la mínima distancia permitida para el corte de los perfiles V-SLOT es de 100 mm, por ello se elige $H = 140 \text{ mm}$, incluyendo las dimensiones de los conectores de tres vías. Por otra parte, de acuerdo con las restricciones presentadas en el capítulo 4, se puede deducir:

$$(L_{es} - A < L_{ep} - L_{es}) \wedge (L_{se} < A),$$

$$(2L_{es} - L_{ep} < A) \wedge (L_{se} < A).$$

Reemplazando $L_{es} = 265.25 \text{ mm}$, $L_{ep} = 347.7 \text{ mm}$, $L_{se} = 137 \text{ mm}$,

$$(182.28 \text{ mm} < A) \wedge (137 \text{ mm} < A),$$

$$182.28 \text{ mm} < A.$$

Así, para posibilitar espacio para la inclusión de soportes en los *enclosures* secundarios, se elige $A = 210 \text{ mm}$, incluyendo la dimensión de los conectores.

Finalmente, debido a que el diámetro promedio de una mano es de 80 mm y se tiene en consideración el uso de tres *enclosure* se puede deducir la siguiente expresión teniendo en cuenta esta restricción:

$$3 \cdot (\text{Diámetro promedio}) < L,$$

$$240 \text{ mm} < L.$$

Se elige 250 mm como longitud para el perfil, entonces $L = 290 \text{ mm}$.

B.2. Cálculo de la fuerza de arrastre.

Una de las cargas que actúan en el análisis de los casos de sollicitación máxima es la fuerza de arrastre producida por el fluido, en este caso agua de mar. Para determinar el coeficiente de arrastre se debe determinar el número de Reynold en la aplicación específica. Para este cálculo se considera la siguiente expresión para obtener el diámetro característico de la geometría:

$$D = 4 \frac{A}{P}.$$

Donde:

- A : Área de la sección de análisis, en m^2 .
- P : Perímetro de la sección de análisis, en m .
- D : Diámetro característico de la sección de análisis, en m .

Reemplazando $A = 0.29 \cdot 0.21 = 0.06 \text{ m}$, $P = 2 \cdot (0.29 + 0.21) = 1.00 \text{ m}$.

$$D = 4 \frac{0.06}{1.00} = 0.24 \text{ m}.$$

El número de Reynolds se calcula con la siguiente expresión:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}.$$

donde:

- D : Diámetro característico del objeto, en m .
- μ : Viscosidad dinámica del fluido, en $\text{Pa} \cdot \text{s}$.
- Re : Número de Reynold, adimensional.

Así, reemplazamos $\rho = 1027.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $v = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $D = 0.24 \text{ m}$, $\mu = 1.8 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu},$$

$$Re = \frac{(1027.1)(2)(0.24)}{1.8 \cdot 10^{-3}},$$

$$Re = 2.78 \cdot 10^5.$$

De acuerdo a la figura B.2, considerando que el número de Reynolds es mayor a 10^4 , obtenemos $C_D = 1.90$ (Aziz et al., 2008).












Type of body	Reference area S ($b = \text{length}$)	Reynolds number Re	Drag coefficient C_D
Square rod		$S = b D$	$Re > 10^4$ → 2.00
		$S = b D$	$Re > 10^4$ → 1.50
Semicircular shell		$S = b D$	$Re > 10^4$ → 1.20 ← 2.30
Semicircular cylinder		$S = b D$	$Re > 10^4$ → 1.15 ← 2.15
Equilateral triangle cylinder		$S = b D$	$Re > 10^4$ → 1.40 ← 2.10
Flat plate		$S = b D$	$Re > 10^4$ → 1.90
T-beam		$S = b D$	$Re > 10^4$ → 1.80 ← 1.65
I-beam		$S = b D$	$Re > 10^4$ → 2.05
Hexagon		$S = b D$	$Re > 10^4$ → 1.00
		$S = b D$	$Re > 10^4$ → 0.70
Circular cylinder		$S = b D$	$Re > 10^4$ → 0.51

Figura B.2: Coeficiente de arrastre de acuerdo al número de Reynolds (Fuente: Aziz et al.).

La expresión que permite calcular la fuerza de arrastre es la siguiente:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A.$$

Donde:

- ρ : Densidad del fluido, en kg/m^3 .
- v : Velocidad de desplazamiento, en m/s .
- C_D : Coeficiente de arrastre que depende de la geometría del objeto y el número de Reynolds, adimensional.
- A : Área de contacto perpendicular al desplazamiento relativo, en m^2 .
- F_D : Fuerza de arrastre, en N .

De la expresión, obtenemos la fuerza de arrastre:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A,$$

$$F_D = \frac{1}{2} (1027.1)(2)^2 (1.90)(0.06),$$

$$F_D = 237.69 \text{ N}.$$

B.3. Cálculo de la resistencia de la estructura de soporte.

Como se mostró en secciones anteriores, es posible analizar el conjunto como un sistema hiperestático de viga doblemente empotrada para los dos casos planteados. A continuación, se realizará el análisis individual de cada uno de ellos.

Caso 1:

Las cargas que se aplican al sistema de análisis se pueden analizar individualmente aplicando el principio de superposición, esto se puede ver en la figura B.3.

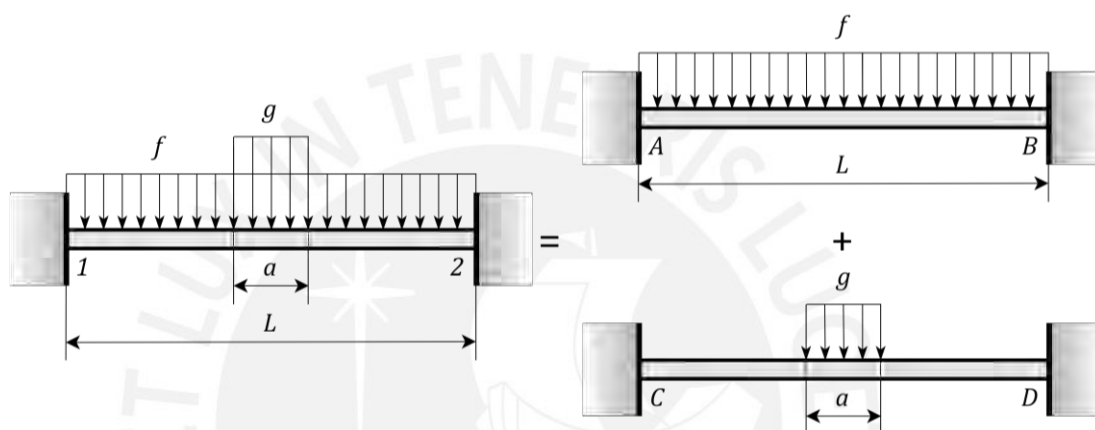


Figura B.3: Configuración del caso 1 (Fuente: Elaboración propia).

Donde las cargas f , carga debido a la fuerza de arrastre, y g , carga producto del peso del sistema, se calculan con las siguientes expresiones:

$$f = \frac{F_D}{L}, g = \frac{W}{a}.$$

Reemplazando $L = 250 \text{ mm}$ (longitud del perfil horizontal), $W = 9.81 \cdot 9 = 88.29 \text{ N}$, $a = 60 \text{ mm}$ (dimensión de contacto entre el soporte de *enclosure* principal y los perfiles de soporte), se obtiene:

$$f = \frac{237.69}{250}, g = \frac{88.29}{60},$$

$$f = 0.95 \frac{\text{N}}{\text{mm}}, g = 1.47 \frac{\text{N}}{\text{mm}}.$$

Así, los casos individuales presentados ya han sido desarrollados en la literatura, por lo que a continuación se presentarán las expresiones para obtener los momentos en los apoyos empotrados:

$$M_A = \frac{fL^2}{12}, M_B = -M_A, M_C = \frac{ga^3}{12L^2} \left(\frac{3L^3}{2a^2} - \frac{L}{2} \right), M_D = -M_C.$$

Reemplazando los valores obtenidos con anterioridad:

$$M_A = \frac{(0.95)(250^2)}{12} = 4951,91 \text{ N} \cdot \text{mm},$$

$$M_B = -4951,91 \text{ N} \cdot \text{mm},$$

$$M_C = \frac{(1.14)(60^2)}{12(250^2)} \left(\frac{3(250^3)}{2(60^2)} - \frac{250}{2} \right) = 2706.09 \text{ N} \cdot \text{mm},$$

$$M_D = -2706.09 \text{ N} \cdot \text{mm}.$$

Para obtener las reacciones verticales y momentos en los apoyos se utilizan las siguientes expresiones:

$$F_1 = F_2 = \frac{fL + ga}{2}, M_1 = M_A + M_C, M_2 = M_B + M_D.$$

Reemplazando:

$$F_1 = F_2 = 162.99 \text{ N},$$

$$M_1 = 7659.99 \text{ N} \cdot \text{mm},$$

$$M_2 = -7659.99 \text{ N} \cdot \text{mm}.$$

A partir de ello, se presenta el diagrama de fuerza cortante en la figura B.4.

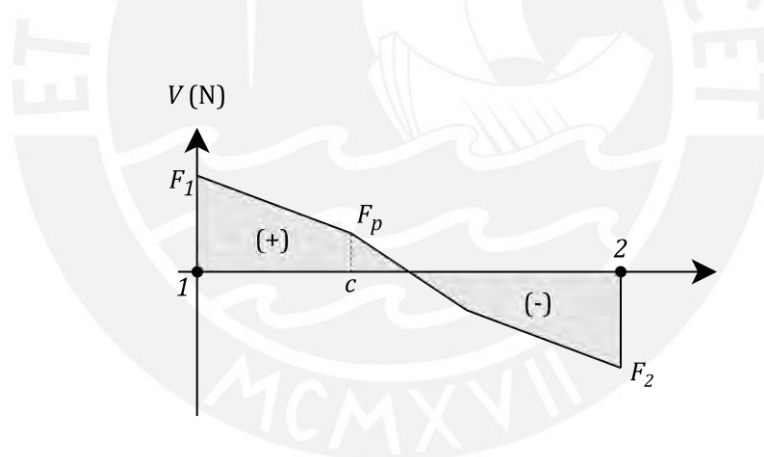


Figura B.4: Diagrama de momento flector del caso 1 (Fuente: Elaboración propia).

Donde:

$$c = \frac{L - a}{2} = \frac{250 - 60}{2} = 95 \text{ mm},$$

$$V_{(x=c)} = F_p = F_1 - fc = 162.99 - (0.95)(95) = 72.67 \text{ N}.$$

Los puntos de solicitación máxima se ubican en los extremos y centro del sistema. El momento flector en el centro se puede calcular con la siguiente expresión:

$$M_c = -M_1 + \frac{F_1 + F_p}{2} c + \frac{F_p a}{4},$$

$$M_c = -7206.98 + \frac{155.63 + 65.31}{2}(95) + \frac{(65.31)(60)}{4} = 4625.81 N \cdot mm.$$

Como se puede observar el momento flector en el apoyo es mayor al momento ubicado en el centro. Por ello, el punto de máxima sollicitación se encuentra en los extremos. Los esfuerzos producto del momento y de la fuerza cortante se calculan con las siguientes expresiones:

$$\sigma_M = \frac{M_1 d}{I_{zz}}, \sigma_V = \frac{F_1}{A}.$$

donde:

- d : Distancia del centro de la sección de análisis al extremo superior de esta, en mm.
- A : Área de la sección en el punto de análisis, en mm^2 .
- I_{zz} : Inercia de área respecto al eje Z de la sección en el punto de análisis, en mm^4 .

En la figura B.5 se muestran los parámetros presentados:

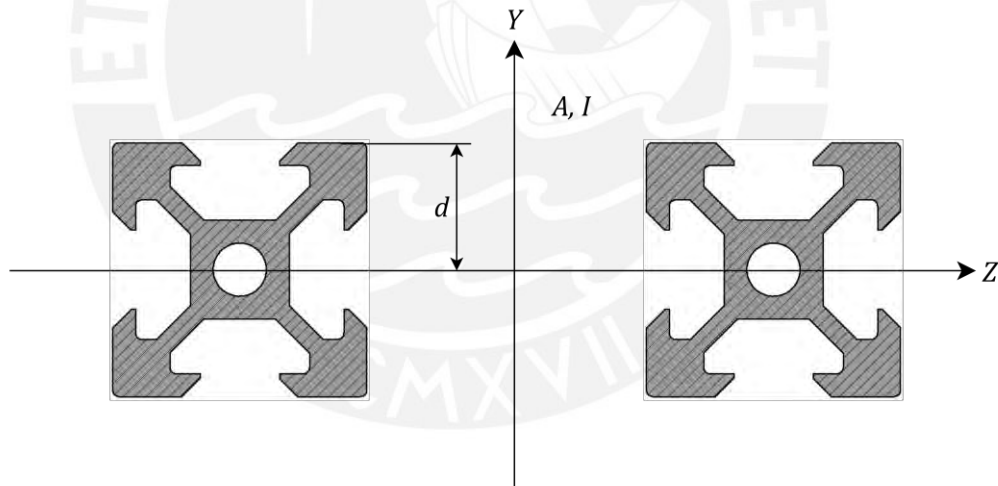


Figura B.5: Sección de análisis (Fuente: Elaboración propia).

A partir de los datos obtenidos de los proveedores de este tipo de perfil y análisis dimensional en el programa Autodesk Inventor, las propiedades de la sección son las siguientes:

$$d = 10 \text{ mm}, A = 344.88 \text{ mm}^2, I_{zz} = 13976 \text{ mm}^4.$$

Reemplazando en las expresiones anteriores obtenemos:

$$\sigma_M = \frac{M_1 d}{I_{zz}} = \frac{(7206.98)(10)}{13976} = 5.48 \text{ MPa},$$

$$\sigma_V = \frac{F_1}{A} = \frac{155.63}{344.88} = 0.47 \text{ MPa}.$$

Considerando la teoría de falla de Von Mises, se debe cumplir con la siguiente expresión:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_M^2 + 3\sigma_V^2} \leq \frac{\sigma_f}{2}.$$

Además, el límite de fluencia del aluminio 6061 es $\sigma_f = 255 \text{ MPa}$ (Hibbeler, 2016), finalmente:

$$\sigma_{eq} = 5.54 \text{ MPa} < 127.5 \text{ MPa}.$$

Caso 2:

La configuración y cargas del caso 2 se muestran en la figura B.6.

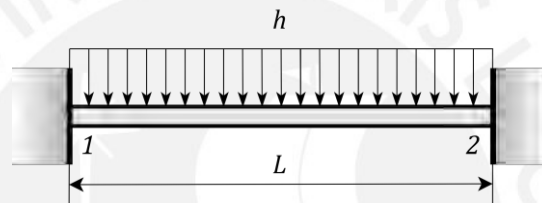


Figura B.6: Configuración del caso 2 (Fuente: Elaboración propia).

El valor de h se calcula con la siguiente expresión:

$$h = \frac{F_d + W}{L} = 1.30 \frac{N}{mm}.$$

Análogamente al caso 1, la reacciones y momentos en los extremos se calculan de la siguiente forma:

$$F_1 = F_2 = \frac{hL}{2} = 162.99 \text{ N},$$

$$M_1 = \frac{hL^2}{12} = 6791.28 \text{ N} \cdot \text{mm}.$$

Al igual que el caso 1, la máxima sollicitación se encuentra en el apoyo:

$$\sigma_M = \frac{M_1 d}{I_{zz}} = \frac{(6791.28)(10)}{13976} = 4.86 \text{ MPa},$$

$$\sigma_V = \frac{F_1}{A} = \frac{162.99}{344.88} = 0.47 \text{ MPa},$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_M^2 + 3\sigma_V^2} = 4.93 \text{ MPa} < 127.5 \text{ MPa}.$$

Como se pudo observar, en ambos casos analizados los perfiles de la estructura de soporte no fallan.

B.4. Cálculo del espesor de los *enclosures*.

Con el fin de analizar la resistencia de los *enclosures* de aluminio 6061 y determinar el espesor mínimo requerido para los diferentes tamaños propuestos, se considerará que estos son recipientes de pared delgada sometidos a una presión de compresión exterior (Hibbeler, 2016). Las expresiones que permiten obtener los esfuerzos principales máximos en este tipo de configuración son las siguientes:

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t}, \sigma_2 = \frac{pr}{2t}.$$

Donde:

- p : Presión a la cual está sometida el recipiente, en MPa.
- r : Radio interno del recipiente, en mm.
- t : Espesor de recipiente, en mm.

Por otra parte, considerando que estos esfuerzos son perpendiculares y únicos en el punto de máxima sollicitación, aplicando la teoría de fallas de Von Mises, se debe cumplir la siguiente condición:

$$\frac{\sigma_1}{2} \leq \frac{\sigma_f}{2},$$

$$\frac{pr}{t} \leq \sigma_f,$$

$$\frac{pr}{\sigma_f} \leq t.$$

Reemplazando para un *enclosure* de 4 pulg: $p = 7.6 \text{ MPa}$, $r = 50 \text{ mm}$, $\sigma_f = 255 \text{ MPa}$.

$$\frac{(7.6)(50)}{255} \leq t,$$

$$1.49 \text{ mm} \leq t.$$

Reemplazando para un *enclosure* de 3 pulg: $r = 41.33 \text{ mm}$.

$$\frac{(7.6)(41.33)}{255} \leq t,$$

$$1.23 \text{ mm} \leq t.$$

Reemplazando para un *enclosure* de 2 pulg: $r = 25.56 \text{ mm}$.

$$\frac{(7.6)(25.56)}{255} \leq t,$$

$$0.76 \text{ mm} \leq t.$$

Así, los *enclosure* que proveen el distribuidor BlueRobotics cumplen con el espesor mínimo: $t_{4 \text{ inch}} = 2.54 \text{ mm}$, $t_{3 \text{ inch}} = 1.91 \text{ mm}$, $t_{2 \text{ inch}} = 3.44 \text{ mm}$.

B.5. Cálculo del espesor necesario de los sellos laterales.

Para determinar el espesor necesario de los sellos laterales, es necesario hacer las siguientes asunciones:

- Se considerará que el material usado para este sello (aluminio 6061-T6) es isotrópico, homogéneo y sigue la ley de Hook.
- Se considerará que se está trabajando con un platillo delgado con el fin de utilizar la teoría de elasticidad para obtener sus esfuerzos y deformaciones.
- Las cargas se aplicarán de forma perpendicular al platillo y este se encontrará empotrado en su contorno debido a las uniones atornilladas con la capa de unión con el *enclosure*.

Definidas las consideraciones para el cálculo del espesor requerido, se utilizará la teoría de elasticidad aplicada a platillos delgados del libro *Theory of plates and shells* de Stephen Timoshenko (Timoshenko, 1974), en donde se presenta la deducción detallada de las expresiones utilizadas.

Primero, se debe considerar la siguiente notación:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

Donde:

- D : Rigidez a la flexión, en $N \cdot mm^2$.
- E : Módulo de elasticidad del material, en MPa.
- h : Espesor del platillo, en mm.
- ν : Módulo de poisson, adimensional.

Por otra parte, las expresiones para determinar los esfuerzos y deformación máximas de un platillo con las condiciones descritas se muestran a continuación:

$$(\sigma_r)_{max} = (\sigma_t)_{max} = \sigma_p = \frac{3(3+\nu)qr^2}{8h^2},$$

$$w_{max} = \frac{qr^4}{64D}$$

Donde:

- q : Carga en la superficie del platillo, en N/mm^2 .
- r : Radio de la sección efectiva que genera la flexión, en mm.
- σ_r : Esfuerzo radial, en MPa.
- σ_t : Esfuerzo tangencial, en MPa.

Por otra parte, considerando que los esfuerzos tangencial y radial son perpendiculares y son los únicos presentes en el punto de máxima sollicitación, aplicando la teoría de fallas de Von Misses, se debe cumplir la siguiente condición:

$$\frac{\sigma_p}{2} \leq \frac{\sigma_f}{2}.$$

Combinando las ecuaciones se obtiene:

$$\frac{3(3 + \nu)qr^2}{16h^2} \leq \frac{\sigma_f}{2},$$

$$\sqrt{\frac{3(3 + \nu)qr^2}{8\sigma_f}} \leq h.$$

Para el sello lateral del *enclosure* principal de 4 pulg: $\nu = 0.35, q = 7.6 \text{ MPa}, r = 42 \text{ mm}, \sigma_f = 255 \text{ MPa}$

$$\sqrt{\frac{3(3 + 0.33)(7.6)(42^2)}{8(255)}} \leq h,$$

$$8.13 \text{ mm} \leq h.$$

Selecciona un espesor de 14 mm de espesor mínimo para el sello de 4 pulg cerrado para obtener un factor de seguridad mínimo de $FS = 2.5$. Y, con el fin de poseer mayor rigidez y seguridad ante falla en el sello lateral de 4 pulg con agujerps se elige un espesor mínimo de 16 mm.

Para el sello lateral del *enclosure* de 3 pulg reemplazamos $r = 30 \text{ mm}$.

$$\sqrt{\frac{3(3 + 0.33)(7.6)(30^2)}{8(255)}} \leq h,$$

$$5.80 \text{ mm} \leq h.$$

Selecciona un espesor de 10 mm de espesor mínimo ($FS_{min} = 2.5$) con el fin de poseer mayor rigidez.

B.6. Cálculo de las dimensiones de los *O-Ring* de los sellos laterales.

De acuerdo con las recomendaciones para la selección de los *O-Rings* (norma AS568), se requiere que el *stretch* de estos se encuentre entre 1 % y 5 %, y su *squeeze* se encuentre entre 0 % y 30 % para cargas estáticas (Parker Seals, 2001). Se considera que la naturaleza de las fuerzas que actúan sobre los *O-Rings* son estáticas, debido a que no existe movimiento relativo entre las superficies de los sellos laterales y el contenedor cilíndrico.

Se seleccionarán dos *O-Rings* por cada sello y sus diámetros deben poseer el mayor diámetro posible con el fin de proveer mayor área de contacto (ver figura B.7).

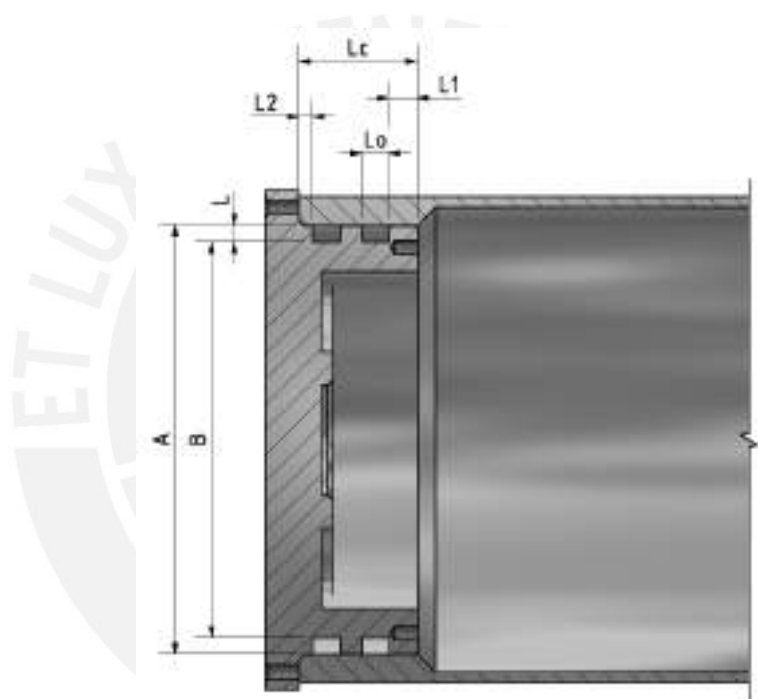


Figura B.7: Dimensiones de interés en el contacto entre sello lateral y contenedor cilíndrico (Fuente: Elaboración propia).

Donde:

- L_c : Longitud de contacto entre el sello lateral y el contenedor, en mm.
- L_1 : Distancia entre el fin de contacto y la ranura del segundo *O-Ring*, en mm.
- L_2 : Distancia entre el fin de contacto y la ranura del primer *O-Ring*, en mm.
- L_o : Diámetro máximo de los *O-Ring*, en mm.
- A : Diámetro interior del contenedor, en mm.
- B : Diámetro interior de la ranura del *O-Ring*, en mm.
- L : Profundidad de la ranura del *O-Ring*, en mm.

Considerando $L = 21 \text{ mm}$, $L_1 = 5 \text{ mm}$, $L_2 = 2.5 \text{ mm}$ y $FS = 3 \text{ mm}$, se deduce que el diámetro del *O-Ring* se puede obtener de la siguiente forma:

$$2L_o + L_1 + L_2 + FS < L,$$

$$L_o < \frac{21 - 2.5 - 5 - 3}{2},$$

$$L_o < 4.75 \text{ mm (1.87 pulg)}.$$

Se selecciona la serie 239 con diámetro de 0.139 pulg (3.53 mm). Por otra parte, para calcular el diámetro interno de la ranura se utiliza la siguiente expresión:

$$B = A - 2L.$$

Considerando $L = 2.85 \text{ mm}$ como valor medio recomendado para esta dimensión, se obtiene $B = 94.96 \text{ mm}$.

Así, tomando en consideración las restricciones de *squeeze* y *stretch* se calculará el diámetro interno del *O-Ring*, con la siguiente expresión:

$$ID_{\min} = \frac{B}{1 + \%stretch_{\max}},$$

$$ID_{\max} = \frac{B}{1 + \%stretch_{\min}}.$$

Donde ID es el diámetro interno del *O-Ring*, en mm. Reemplazando los valores correspondientes obtenemos que $ID_{\min} = 90.44 \text{ mm}$ y $ID_{\max} = 94.02 \text{ mm}$. Así, el *O-Ring* que cumple con esta restricción es el número 239 con un diámetro interno de 91.67 mm (3.609 pulg). De acuerdo a los valores recomendados para *O-Rings* de esta serie, se selecciona una profundidad de ranura de $L = 2.91 \text{ mm}$, ancho de ranura de $G = 4.83 \text{ mm}$ y un espacio libre entre elementos de $E = 0.07 \text{ mm}$. Así, con estos valores se genera un *stretch* de 3.45 %.

Por otra parte, es necesario verificar que el *squeeze* del *O-Ring* se encuentra entre los valores límites, para ello de la figura B.8 se obtiene el porcentaje de reducción del diámetro del *O-Ring* después de la instalación teniendo como entrada el *stretch*.

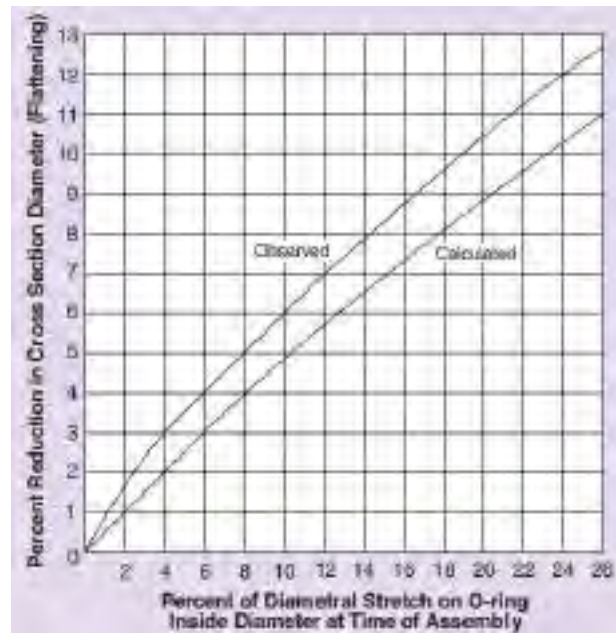


Figura B.8: Reducción del diámetro vs stretch del O-Ring

(Fuente: Parker Seals).

El diámetro final D_f después del estiramiento es de 3.45 mm y se puede obtener su *squeeze* con la siguiente expresión:

$$\%squeeze = \frac{D_f - L}{D_f} \cdot 100\%.$$

Reemplazando los valores correspondientes se obtiene un *squeeze* de 15.55 %, el cual se encuentra en el rango permitido.

Análogamente al caso anterior, se selecciona un *O-Ring* de tamaño 232 para los sellos laterales de los contenedores de 3 pulg. Estos *O-Rings* cuentan con un diámetro interno de 69.44 (mm), produciendo un *stretch* de 1.35 % y *squeeze* de 16.66 %, los cuales se encuentran dentro de los rangos recomendados.

B.7. Cálculo de la fuerza de arrastre en la cubierta delantera.

Se simplificará la geometría del elemento a un plano cuadrado, reemplazando $A = 0.29 \cdot 0.14 = 0.04 \text{ m}$, $P = 2 \cdot (0.29 + 0.14) = 0.86 \text{ m}$ en:

$$D = 4 \frac{A}{P},$$

$$D = 0.19 \text{ m}.$$

Por otra parte, obtenemos el número de Reynolds reemplazando $\rho = 1027.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $v = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ y $\mu = 1.8 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu},$$

$$Re = 2.16 \cdot 10^5.$$

De la figura C.2 obtenemos la constante de arrastre $C_D = 1.90$ para la geometría. Así, reemplazando los valores en la expresión:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A,$$

$$F_D = 158.46 \text{ N}.$$

La fuerza de arrastre máxima sobre la geometría es de 158.46 N.

B.8. Cálculo de la superposición de imagen en función de la distancia entre sistema y el entorno submarino.

Para el cálculo de la superposición entre las imágenes de las cámaras principal y secundarias, se considerará que la imagen capturada del entorno por las cámaras se encuentra dentro de una elipse que es proyectada en función de los ángulos de apertura verticales y horizontales de las cámaras. Para hallar los radios de esta elipse se utiliza la siguiente expresión:

$$R = X \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right).$$

Donde:

- R : Radio principal de la elipse en función del ángulo de apertura, en m.
- X : Distancia entre el sistema y el entorno submarino, en m.
- θ : Ángulo de apertura, en $^{\circ}$.

En la figura B.9 se muestra la superposición entre las imágenes de la cámara principal (color naranja) y cámara secundaria (color verde).

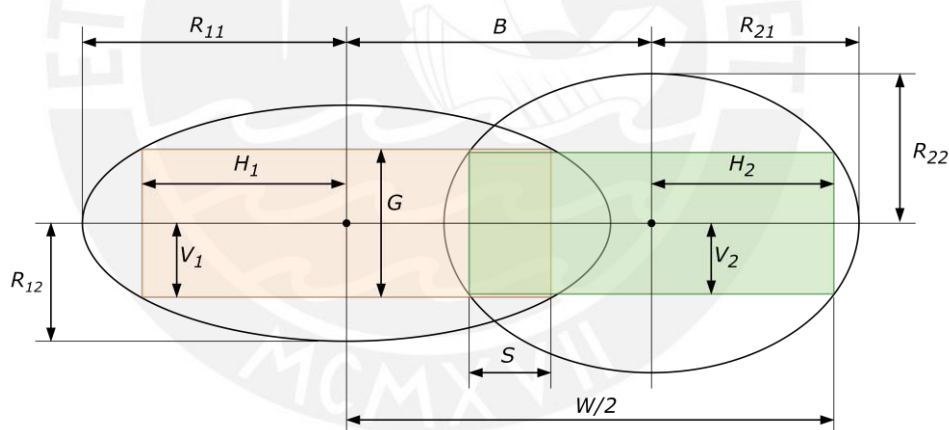


Figura B.9: Superposición entre cámara principal y secundaria

(Fuente: Elaboración propia).

A partir de ello, se puede deducir la superposición generada con las siguientes expresiones:

$$V_i = X \cdot \sqrt{\frac{\tan^2\left(\frac{\alpha_i}{2}\right) \cdot \tan^2\left(\frac{\beta_i}{2}\right)}{P_i^2 \tan^2\left(\frac{\beta_i}{2}\right) + \tan^2\left(\frac{\alpha_i}{2}\right)},$$

$$H_i = P_i \cdot V_i,$$

$$W = 2 \cdot (B + H_2),$$

$$G = 2 \cdot \max(V_1, V_2),$$

$$S = \frac{H_1 + H_2 - X}{H_2} \cdot 100 \%.$$

Donde:

- V_i : Radio de apertura vertical de la cámara i a una distancia L , en m.
- H_i : Radio de apertura horizontal de la cámara i a una distancia L , en m.
- P_i : Proporción entre la cantidad de píxeles horizontales y verticales de la imagen de la cámara i , adimensional.
- W : Ancho del área de sensado del sistema, en m.
- G : Altura del área de sensado del sistema, en m.
- α_i : Ángulo de apertura horizontal de la cámara i , en $^\circ$.
- β_i : Ángulo de apertura vertical de la cámara i , en $^\circ$.

Considerando que la cámara principal es la cámara uno y la secundaria como la cámara dos, para hallar el porcentaje de superposición mínimo reemplazamos $\alpha_1 = 99.02^\circ$, $\beta_1 = 51.81^\circ$, $\alpha_2 = 80^\circ$, $\beta_2 = 64^\circ$, $P_1 = P_2 = 1.78$, $X = 0.1374 \text{ cm}$ y $B = 0.09 \text{ m}$ obteniendo que la superposición de imágenes mínima es de $S = 52.99 \%$, con $W = 0.364 \text{ m}$ y $G = 0.107 \text{ m}$. Particularmente, a una distancia $L = 0.160 \text{ m}$ se obtiene una superposición $S = 60 \%$.

Por otra parte, para obtener una superposición mínima de 98 % entre cualquiera de las tres cámaras, se debe analizar la superposición entre las cámaras laterales debido a que la distancia base y su superposición entre estas es la máxima. Reemplazando y despejando las ecuaciones en función de L , obtenemos que para $L = 6.721 \text{ m}$ se obtiene esta superposición mínima.

B.9. Verificación de cobertura total de luz del área de sensado y cálculo del rango máximo en función de luz disipada

Como se mencionó, las luces estarán distribuidas en un arreglo rectangular. Y, debido a que las cámaras necesitan una iluminación mínima requerida para que puedan adquirir los datos correctamente, se debe analizar la dispersión de la luz generada cuando se adquieren imágenes a una distancia específica L . En la figura B.10 se muestra el área que debe abarcar la iluminación de las luces submarinas a una distancia mínima de operación L para que se provea iluminación a toda el área de sensado.

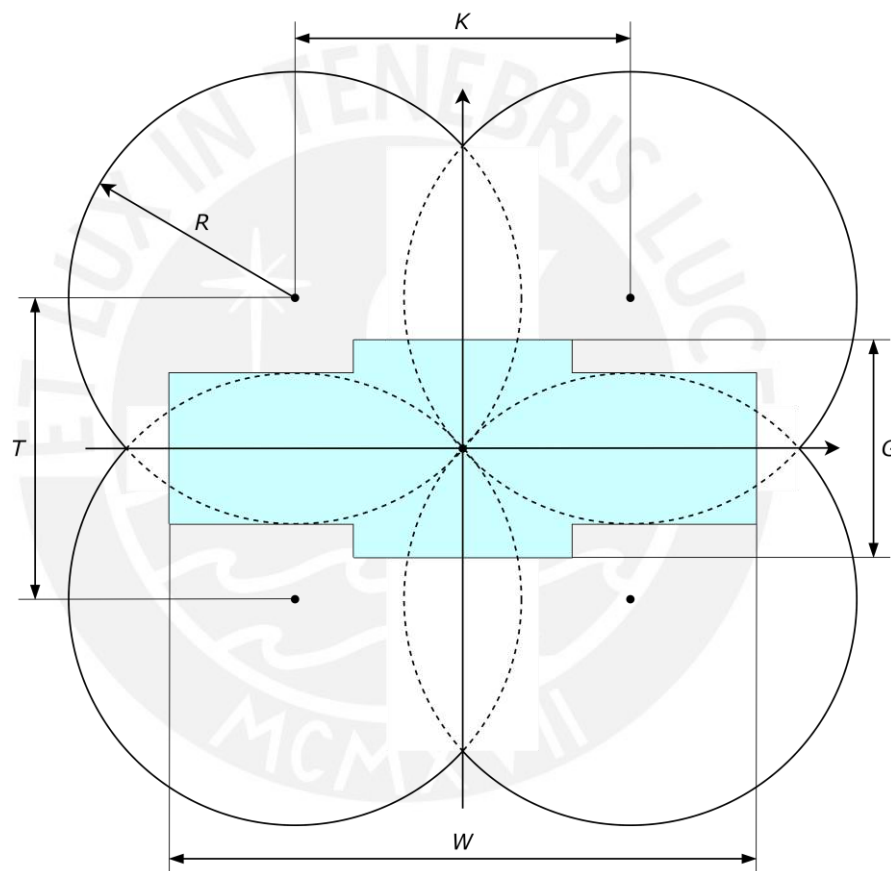


Figura B.10: Área de cobertura mínima de luz (Fuente: Elaboración propia).

Para hallar el radio del área de dispersión se utiliza la siguiente expresión:

$$R = X \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right).$$

Donde:

- R : Radio del área de dispersión del emisor submarino, en m.
- X : Distancia entre el sistema y el entorno submarino, en m.
- θ : Ángulo de apertura de las luces submarinas, en $^{\circ}$.

Por otra parte, para hallar el radio de dispersión para la distancia de operación mínima L , se utiliza la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\sqrt{T^2 + K^2}}{2}.$$

Donde:

- T : Separación vertical de las luces submarinas, en m.
- K : Separación horizontal de las luces submarinas, en m.

Reemplazando: $T = 0.28 \text{ m}$, $K = 0.44 \text{ m}$ y $\theta = 135^\circ$ obtenemos que la distancia mínima de operación es $X = 0.108 \text{ m}$ con $R = 0.261 \text{ m}$ para su modo de uso por buzo; y para su modo de uso por ROV con $\theta = 100^\circ$ se obtiene $X = 0.219 \text{ m}$. Así, se debe verificar que la luz cubra toda el área de sensado de las cámaras. Por ello, se debe cumplir las siguientes expresiones para que se cumpla esta condición:

$$\sqrt{\left(\frac{T-G}{2}\right)^2 + \left(\frac{K-W}{2}\right)^2} \leq R,$$

$$\sqrt{\left(\frac{T}{2}\right)^2 + \left(\frac{K-W}{2}\right)^2} \leq R,$$

$$\sqrt{\left(\frac{T-G}{2}\right)^2 + \left(\frac{K}{2}\right)^2} \leq R.$$

Considerando los valores de $W = 0.299 \text{ m}$ y $G = 0.070 \text{ m}$ de las ecuaciones deducidas del Anexo B.8, obtenemos:

$$\sqrt{\left(\frac{0.2 - 0.070}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.38 - 0.299}{2}\right)^2} = 0.077 \leq 0.261,$$

$$\sqrt{\left(\frac{0.2}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.38 - 0.299}{2}\right)^2} = 0.107 \leq 0.261,$$

$$\sqrt{\left(\frac{0.2 - 0.070}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.38}{2}\right)^2} = 0.201 \leq 0.261.$$

Se comprueba que se abarca toda el área de sensado, y debido a que el crecimiento radial que abarcan las luces submarinas y el área de sensado de las imágenes es lineal, se puede concluir que el área de iluminación siempre abarcará al área de adquisición de imágenes.

Por otra parte, debido a que la intensidad luminosa por unidad de área mínima requerida es de 0.4 lux (correspondiente a la cámara principal), se puede deducir la distancia máxima de operación como:

$$X = \frac{1}{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \cdot \sqrt{\frac{I}{U \cdot \pi}}$$

Donde:

- I : Luminosidad máxima de las luces submarinas, en lm .
- U : Iluminación mínima de las cámaras submarinas, en lux .

Para su modo uso por buzo, reemplazando $I = 1500 \text{ lm}$, $\theta = 135^\circ$ y $U = 0.4 \text{ lux}$ obtenemos que la distancia máxima de adquisición de imágenes es $X = 14.31 \text{ m}$. Por otra parte, para su uso por ROV, reemplazando $I = 2500 \text{ lm}$, $\theta = 100^\circ$ y $U = 0.4 \text{ lux}$ obtenemos que la distancia máxima de adquisición de imágenes es $X = 37.43 \text{ m}$



B.10. Cálculo del torque de ajuste de los tornillos de conexión

Las uniones que soportarán las máximas solicitaciones de fuerza se encuentran en la unión de los elementos de sujeción del *enclosure* principal. En este sentido, debido que se tiene una unión entre tornillo-tuerca y dos planchas de PLA (utilizado para la impresión de las piezas de sujeción), es necesario realizar el análisis de la deformación de los componentes cuando se le aplica la carga máxima (compresión o tracción) a las placas de PLA con el fin de evitar la liberación del ajuste del tornillo durante el caso crítico de compresión. Para ello, es posible obtener la constante de rigidez del tornillo con las siguientes expresiones:

$$c_t = \left(\sum_{i=0}^4 c_{t_i} \right)^{-1},$$

$$c_{t_i} = \frac{EA_i}{L_i}, A_i = \frac{\pi D_i^2}{4}.$$

Donde:

- c_t : Constante de rigidez del tornillo, en N/mm.
- c_{t_i} : Constante de rigidez de los tramos del tornillo en N/mm.
- E : Módulo de elasticidad del tornillo, en MPa.
- A_i : Área de la sección transversal constante del tornillo, en mm.
- D_i : Diámetro de la sección transversal constante del tornillo, en mm.
- L_i : Longitud del tramo correspondiente, en mm.

Para las siguientes expresiones se debe tener en consideración los siguientes parámetros:

- d : Diámetro nominal del tornillo, en mm.
- d_1 : Diámetro de la cabeza del tornillo en contacto con las placas, en mm.
- d_2 : Diámetro de paso, en mm.
- d_3 : Diámetro interior de rosca, en mm.
- L_p : Longitud del espesor de las placas, en mm.

Para los elementos y tornillos $\text{ino} \times \text{socket M3}$ utilizados los valores respectivos son $d = 3 \text{ mm}$, $d_1 = 5.070 \text{ mm}$, $d_2 = 2.675 \text{ mm}$, $d_3 = 2.387 \text{ mm}$, $L_p = 10 \text{ mm}$ y $E = 193000 \text{ MPa}$. Así, la norma VDI2230 recomienda las siguientes longitudes y diámetros según los tramos analizados, los valores para cada tramo y su constante de rigidez:

- Cabeza del tornillo: $L_1 = 0.4d, D_1 = d \rightarrow c_1 = 1136863.84 \frac{N}{mm}$.
- Tramo roscado fuera de la tuerca: $L_2 = L_p, D_2 = d_3 \rightarrow c_2 = 86367.73 \frac{N}{mm}$.
- Tramo roscado al interior de la tuerca: $L_3 = 0.5d, D_3 = d_3 \rightarrow c_3 = 575786.56 \frac{N}{mm}$.
- Filetes en contacto: $L_4 = 0.4d, D_4 = d \rightarrow c_4 = 1136863.84 \frac{N}{mm}$.

Reemplazando los valores obtenemos la constante de elasticidad del tornillo $c_t = 66337.77 N/mm$. Para un UTT (unión tuerca tornillo), se debe analizar el caso de distribución de esfuerzos que presenta esta unión atornillada (ver figura B.11).

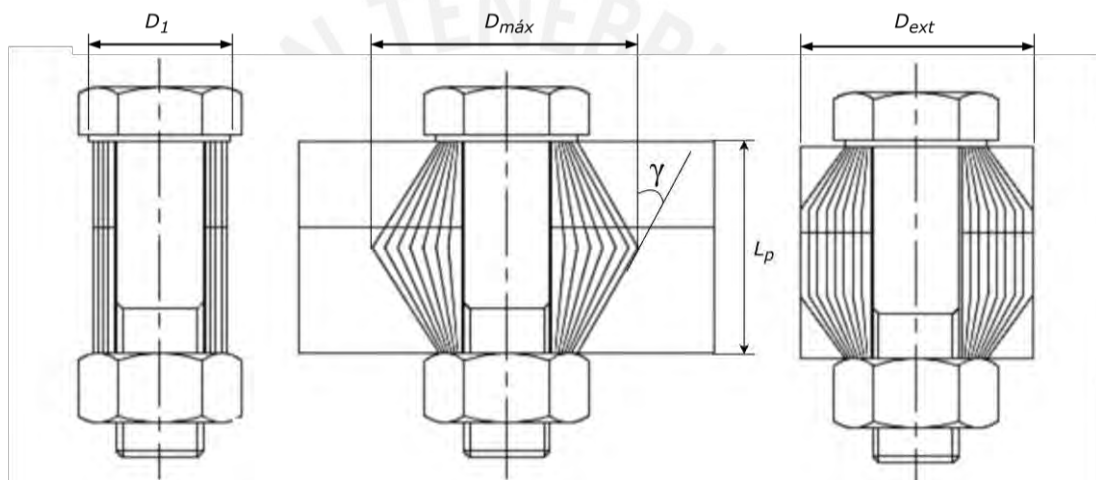


Figura B.11: Casos posibles en la configuración UTT (Fuente: VDI2230).

Donde:

- $D_{m\acute{a}x}$: Diámetro máximo de los esfuerzos de compresión en forma de cono, en mm.
- D_{ext} : Diámetro máximo entre el agujero de montaje y el tremo de las placas, en mm.
- γ : Conicidad del tronco de cono, en $^{\circ}$.

Debido a que $D_{ext} = 10 mm$, no se cumple la condición del primer caso ($d_1 \geq D_{ext}$). Por ello, se analizarán los valores de $D_{m\acute{a}x}$ con las siguientes expresiones para configuraciones UTT:

$$\tan(\gamma) = 0.362 + 0.032 \cdot \ln\left(0.5 \frac{L_p}{d_1}\right) + 0.153 \cdot \ln\left(\frac{D_{ext}}{d_1}\right),$$

$$D_{m\acute{a}x} = d_1 + L_p \cdot \tan(\gamma).$$

Reemplazando los valores obtenemos $\gamma = 35.05^\circ$, $D_{m\acute{a}x} = 12.085 \text{ mm}$. Como $D_{m\acute{a}x} > D_{ext}$ se puede concluir que el caso de análisis es el tercero, donde se debe analizar la constante de elasticidad para el cono se obtiene con las siguientes expresiones:

$$c_{con} = \frac{\pi E D_{ag} \tan(\gamma)}{\ln \left(\frac{(D_{2con} - D_{ag})(D_{1con} + D_{ag})}{(D_{2con} + D_{ag})(D_{1con} - D_{ag})} \right)}$$

Donde:

- c_{con} : coeficiente de elasticidad de un cono, en N/mm.
- D_{ag} : Diámetro del agujero de montaje, en mm.
- D_{1con} : Diámetro menor del cono, en mm.
- D_{2con} : Diámetro mayor del cono, en mm.

Reemplazando $D_{ag} = 3.40 \text{ mm}$, $D_{1con} = D_1$ y $D_{2con} = D_{m\acute{a}x}$ obtenemos $c_{con} = 19204.99 \text{ N/mm}$. Por otro lado, el coeficiente de elasticidad de un cilindro hueco se obtiene con la siguiente expresión:

$$c_{cil} = \frac{\pi E (D_{cil}^2 - D_{ag}^2)}{4L_{cil}},$$

$$L_{cil} = L_p - 2 \cdot \frac{D_{ext} - D_1}{\tan(\gamma)}.$$

Donde:

- c_{cil} : coeficiente de elasticidad de un cilindro, en N/mm.
- D_{cil} : Diámetro exterior del cilindro, en mm.
- L_{cil} : Longitud del cilindro, en mm.

Reemplazando $D_{cil} = D_{ext}$ obtenemos $c_{cil} = 8770.37 \text{ N/mm}$. Luego, aplicando el mismo método para el cálculo de la constante elástica del tornillo, obtenemos la siguiente expresión:

$$c_p = \left(\frac{1}{c_{con}} + \frac{1}{c_{cil}} + \frac{1}{c_{con}} \right)^{-1}.$$

Reemplazando los valores, obtenemos la constante de elasticidad de las placas $c_p = 4583.80 \text{ N/mm}$. La expresión que permite obtener la fuerza de aplicación en el tornillo ante una carga que actúa sobre las placas es la siguiente:

$$F_t = \frac{c_t}{c_t + c_p} \cdot F_{ext},$$

$$F_{ext} = \frac{F_D + W}{n}.$$

Donde:

- F_t : Fuerza normal en el tornillo, en N.
- F_{ext} : Fuerza normal externa aplicada a las placas, en N.
- n : Número de tornillos, adimensional.

El caso crítico ocurrirá cuando la carga total (peso y fuerza de arrastre) sea soportada por solamente dos tornillos; por ello, reemplazando los valores obtenemos anteriormente $F_t = 145.57 \text{ N}$. Así, el torque de ajuste necesario se obtiene con las siguientes expresiones:

$$\tan(\varphi) = \frac{P}{\pi d_2}, \mu' = \tan(\rho') = \mu \cdot \sqrt{1 + \cos^2(\varphi) \tan^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)},$$

$$F_{as} = \frac{c_t \cdot c_p}{c_t + c_p} \cdot \delta_{as}, F_M = F_t + F_{as},$$

$$M = F_M \tan(\varphi + \rho') \cdot \frac{d_2}{2}.$$

Donde:

- P : Paso del tornillo, en mm.
- φ : Ángulo de hélice, en °.
- α : Ángulo en flancos, en °.
- μ : Coeficiente de fricción entre tornillo y tuerca, adimensional.
- μ' : Coeficiente de efectivo fricción entre tornillo y tuerca, adimensional.
- ρ' : Ángulo entre fuerza normal y fuerza de fricción, en °.
- δ_{as} : Asentamiento, en mm.
- F_M : Fuerza montaje del tornillo, en N.
- F_{as} : Fuerza de asentamiento, en N.
- M : Momento de montaje del tornillo, en N · mm.

Considerando el caso crítico de rugosidad promedio máxima de $100 \mu\text{m}$ (precisión de impresión de 0.1 mm), se considera un asentamiento total de $\delta_{as} = 10 \mu\text{m}$. Reemplazando $\mu = 0.5$, $P = 0.5 \text{ mm}$ y $\alpha = 60^\circ$ obtenemos un momento de ajuste de $M = 191.13 \text{ N} \cdot \text{mm}$ ($M = 0,192 \text{ N} \cdot \text{m}$). No obstante, para asegurar el ajuste correcto se elige un torque de ajuste de $M = 200 \text{ N} \cdot \text{mm}$, con una fuerza de montaje de $F = 226.83 \text{ N}$.

B.11. Cálculo de la resistencia de los tornillos

Durante el montaje se producirán los esfuerzos máximos debido a las cargas sometidas en el tornillo, se utilizarán las siguientes expresiones para verificar la resistencia del tornillo:

$$d_s = \frac{d_2 + d_3}{2}, \sigma_M = \frac{4F_M}{\pi d_s^2}, \tau_M = \frac{16M}{\pi d_s^3}, \sqrt{\sigma_M^2 + 3\tau_M^2} \leq 0.9 \cdot \sigma_f.$$

Donde:

- d_s : Diámetro resistente, en mm.
- σ_M : Esfuerzo normal, en MPa.
- τ_M : Esfuerzo de torsión, en MPa.
- σ_f : Esfuerzo de fluencia del material, en MPa.

Reemplazando los valores respectivos obtenemos $d_s = 2,531 \text{ mm}$, $\sigma_M = 45.08 \text{ MPa}$ y $\tau_M = 62.82 \text{ MPa}$. Además, analizando la condición de resistencia con $\sigma_f = 207 \text{ MPa}$:

$$\sqrt{\sigma_M^2 + 3\tau_M^2} = 117,78 \text{ MPa} \leq 186.3 = 0.9 \cdot \sigma_f.$$

Se comprueba que la condición de resistencia se cumple; por ello, los tornillos M3 no fallan durante el montaje.

Por otra parte, la sollicitación máxima del tornillo ocurrirá cuando la fuerza máxima sea de tracción y se utilizarán las siguientes expresiones para verificar la resistencia:

$$F_{top} = F_t + F_M, M_{op} = kM.$$

Donde:

- F_{top} : Fuerza de operación en el tornillo, en N.
- k : Factor de momento residual, adimensional.
- M_{op} : Momento de operación en el tornillo, en N · mm.

Reemplazando $F_t = 143.28 \text{ N}$ y $k = 0.5$ (valor recomendado por la norma VDI 2230) obtenemos $\sigma_M = 73.56 \text{ MPa}$ y $\tau_M = 31.41 \text{ MPa}$. Además, analizando la condición:

$$\sqrt{\sigma_M^2 + 3\tau_M^2} = 91.50 \text{ MPa} \leq 186.3 = 0.9 \cdot \sigma_f.$$

Se comprueba que la condición de resistencia se cumple; por ello, los tornillos M3 no fallan ante las condiciones críticas descritas.

B.12. Cálculo del torque de ajuste y verificación de resistencia de tornillos en acople universal con ROV

La posición crítica de operación se presentará en el instante en que el sistema sea direccionado de forma vertical apuntando hacia abajo, se considerará que la carga máxima actuará en la posición del *enclosure* principal y esta aplicará un momento el cual será absorbido por las uniones atornilladas del acople universal (ver figura B.12).

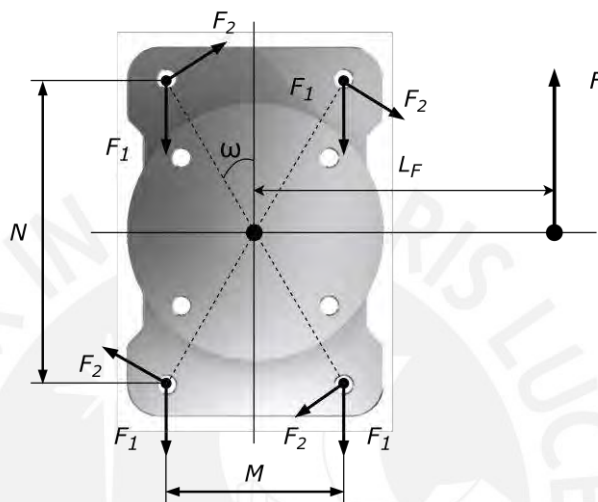


Figura B.12: Cargas en las uniones atornilladas entre acople y sistema
(Fuente: Elaboración propia).

Las fuerzas descritas se hallan con las siguientes expresiones:

$$F_1 = \frac{F}{4},$$

$$F_2 = \frac{F \cdot L_F}{2\sqrt{N^2 + M^2}},$$

$$F_{eq} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}.$$

Donde:

- F_1 : Fuerza vertical en las uniones, en N.
- F : Fuerza de aplicación máxima (peso y fuerza de arrastre), en N.
- F_2 : Fuerza debido al momento generado, en N.
- L_F : Distancia hacia la fuerza de aplicación, en mm.
- N : Distancia vertical entre uniones, en mm.
- L_F : Distancia horizontal entre uniones, en mm.
- F_{eq} : Fuerza equivalente en la unión atornillada, en N.

Reemplazando $F = 311.27 N$, $L_F = 207.386 N$, $N = 95 mm$, $M = 55 mm$, obtenemos $F_1 = 77.82 N$, $F_2 = 294.03 N$ y $F_{eq} = 304.15 N$. Se considerará que todas las cargas equivalentes serán absorbidas entre el rozamiento entre las tuercas y los perfiles; en este sentido, debido a que se utilizarán tuercas en T de acero se puede deducir la siguiente expresión para la fuerza normal de ajuste:

$$F_N = \frac{F_{eq}}{\mu_{AA}}$$

Donde:

- F_N : Fuerza normal de montaje necesaria, en N.
- μ_{AA} : Coeficiente de fricción entre el acero y aluminio, adimensional.

Reemplazando $\mu = 0.61$ obtenemos $F_N = 498.61 N$; así, reemplazando $\mu = 0.8$, $\alpha = 60^\circ$, $P = 0.8 mm$ y $d_2 = 4.48 mm$ en las ecuaciones descritas en el Anexo B.10 para obtener el torque de montaje se obtiene $M = 1256.73 N \cdot mm$. No obstante, se utilizará un torque de montaje de $M = 1700 N \cdot mm$ con una fuerza de montaje de $F_M = 674.48 N$, esto se hace con el fin de compensar el asentamiento. Cabe aclarar que este cálculo no ha considerado el rozamiento entre el perfil y el acople por lo que el rozamiento final será mayor y poseerá mayor confiabilidad. Reemplazando $d_3 = 4.019 mm$, $\sigma_f = 250 MPa$ y los valores presentados en las ecuaciones para verificar la resistencia de los tornillos del Anexo B.11 se obtiene:

$$\sqrt{\sigma_M^2 + 3\tau_M^2} = 201.12 MPa \leq 225 = 0.9 \cdot \sigma_f.$$

Se comprueba que la condición de resistencia se cumple; por ello, los tornillos M5 no fallan ante las condiciones críticas descritas.

B.13. Cálculo y selección de componentes del circuito de protección ante ingreso de agua

El circuito propuesto se basa en el uso de un circuito *latch* y su lógica se basa en control del voltaje de salida V_{out} (ver figura B.13) mediante el voltaje de entrada V_{in} y el voltaje de alimentación V_{DD} , este último con un rango de 9 V a 12.6 V. Este voltaje estará conectado un conmutador electromagnético para activar o desactivar la alimentación eléctrica de todos circuitos y componentes electrónicos del sistema. Este circuito posee cuatro estados posibles de análisis.

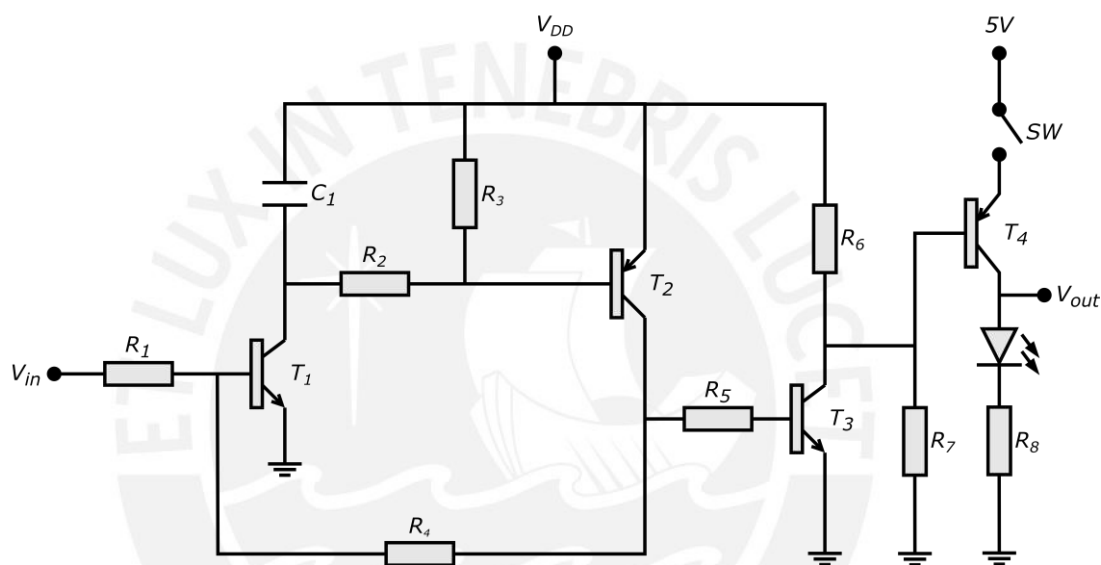


Figura B.13: Circuito de aislamiento (Fuente: Elaboración propia).

Caso 1: Circuito desactivado – switch abierto

Este caso ocurre cuando el *switch* de control se encuentra abierto y, debido a que el voltaje de salida se encuentra únicamente conectado a tierra, su valor será $V_{out} = 0 V$.

Caso 2: Circuito en operación

Este caso ocurre cuando el *switch* de control se encuentra cerrado y el voltaje de entrada tiene un valor de $V_{in} = 0 V$ lo que resulta en el corte de los transistores Q_1 , Q_2 y Q_3 (ver figura B.14). Por otra parte, el transistor Q_4 debe estar activado para el voltaje V_{out} active el módulo de control. Se selecciona $R_8 = 330 \Omega$ para controlar el LED emisor con una corriente estimada de 12 mA.

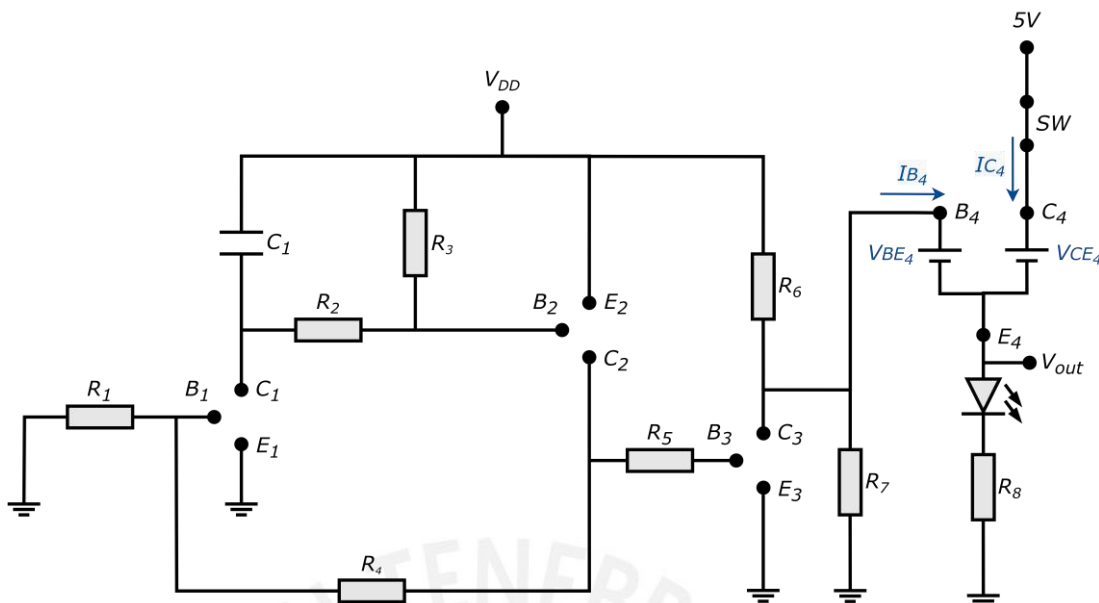


Figura B.14: Circuito en el segundo estado (Fuente: Elaboración propia).

En estos casos se cumple las condiciones de corte mostradas en los transistores:

$$V_{BE_1} = 0 \text{ V} < 0.7 \text{ V}, V_{BC_1} = -V_{DD} < 0.5 \text{ V},$$

$$V_{BE_3} = 0 \text{ V} < 0.7 \text{ V}, V_{BC_3} = -V_{DD} < 0.5 \text{ V},$$

$$V_{EB_2} = 0 \text{ V} < 0.7 \text{ V}, V_{CB_2} = -V_{DD} < 0.5 \text{ V}.$$

Donde:

- V_{BE_i} : Voltaje base – emisor del transistor i , en V.
- V_{BC_i} : Voltaje base – colector del transistor i , en V.
- V_{EB_i} : Voltaje emisor – base del transistor i , en V.
- V_{CB_i} : Voltaje colector – base del transistor i , en V.

Además, se tiene un divisor de voltaje para obtener el valor del voltaje en la base del transistor Q_4 :

$$V_o = V_i \cdot \frac{R_I}{R_I + R_{II}}.$$

Donde:

- V_i : Voltaje de entrada del divisor de voltaje, en V.
- V_o : Voltaje de salida del divisor de voltaje, en V.
- R_I : Resistencia inferior del divisor, en Ω .
- R_{II} : Resistencia superior del divisor, en Ω .

Es necesario seleccionar el valor de las resistencias tal que la ganancia de los transistores sea menor a 100. Esta ganancia se obtiene con la siguiente expresión:

$$\beta_i = \frac{I_{C_i}}{I_{B_i}}$$

Donde:

- β_i : Ganancia del transistor i , en mA.
- I_{C_i} : Corriente en el colector del transistor i , en mA.
- I_{B_i} : Corriente en la base del transistor i , en mA.

Seleccionamos las resistencias R_6 y R_7 para cumplir con la condición de ganancia.

Calculamos la ganancia con la siguiente expresión:

$$\beta_4 = \frac{R_6 R_7 I_{C_4}}{R_7 V_{DD} - 5R_6 + (R_6 - R_7)(5 - V_{CE_4} + V_{BE_4})}$$

Aplicando las leyes de Kirchoff en el circuito presentado y considerando el caso crítico en el cual los voltajes base – emisor (V_{BE}) y colector – emisor (V_{CE}) son máximos e iguales en todos los transistores, es decir:

$$V_{BE} = V_{BE_1} = -V_{BE_2} = V_{BE_3} = 0.7 \text{ V},$$

$$V_{CE} = V_{CE_1} = -V_{CE_2} = V_{CE_3} = 0.2 \text{ V}.$$

Además, considerando $R_I = R_7 = 200 \text{ k}\Omega$, $R_{II} = R_6 = 22 \text{ k}\Omega$, $I_{C_4} = 12 \text{ mA}$ y $V_{DD} = 12.6 \text{ V}$ como voltaje máximo de la batería, obtenemos $\beta_4 = 40.64 < 100$.

Caso 3: Circuito desactivado – voltaje de entrada en alta

Este caso ocurre cuando el *switch* de control se encuentra cerrado y el voltaje de entrada tiene un valor en alto lo que resulta en la saturación de los tres transistores (ver figura B.15).

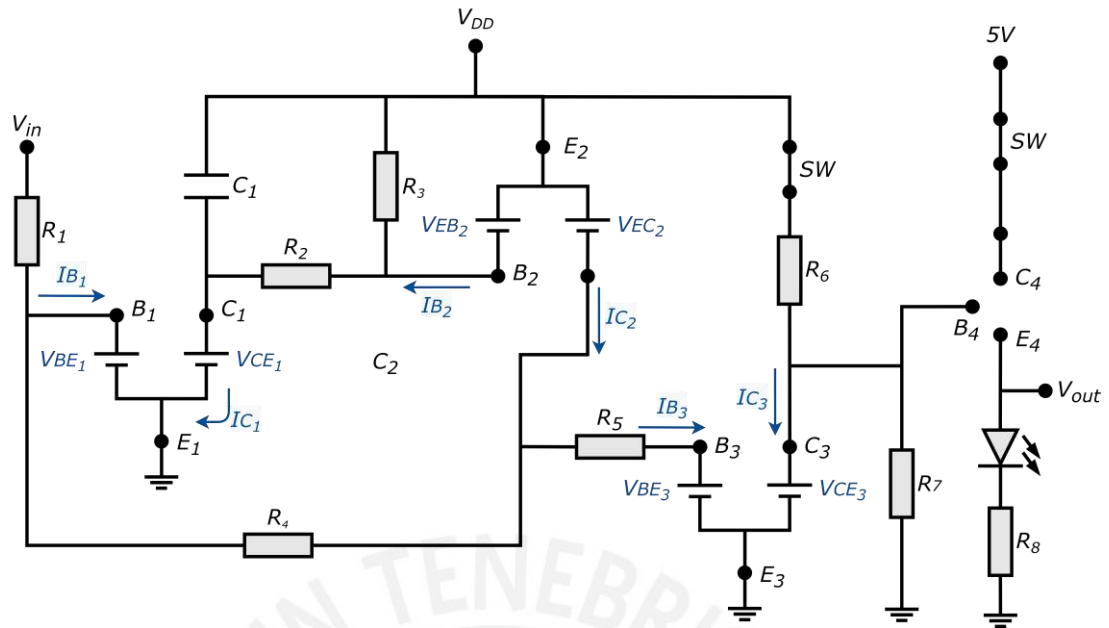


Figura B.15: Circuito en el tercer estado (Fuente: Elaboración propia).

Del circuito, se obtienen las siguientes expresiones:

$$I_{C3} = \frac{V_{DD} - 0.2}{R_6}, I_{B3} = \frac{V_{DD} - 0.9}{R_5},$$

$$I_{C2} = (V_{DD} - 0.9) \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right), I_{B2} = \frac{V_{DD} - 0.9}{R_2} - \frac{0.7}{R_3},$$

$$I_{C1} = \frac{V_{DD} - 0.9}{R_2}, I_{B1} = \frac{V_{DD} - 0.9}{R_4} + \frac{V_{in} - 0.7}{R_1}.$$

Considerando que $V_{DD\min}$ es diez veces mayor a 0.9 V ($V_{DD\min} \gg 0.9\text{ V}$), se escoge una ganancia de 10 para el tercer transistor, esta se muestra a continuación:

$$\beta_3 = \frac{V_{DD} - 0.2}{V_{DD} - 0.9} \cdot \frac{R_5}{R_6} \approx \frac{R_5}{R_6} = 10,$$

$$R_5 = 10R_6.$$

Así, para el primer y segundo transistor se obtienen las siguientes ganancias considerando $R_3 = 10R_2$:

$$\beta_2 = \frac{(V_{DD} - 0.9) \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right)}{\frac{V_{DD} - 0.9}{R_2} - \frac{0.7}{R_3}} \approx R_2 \cdot \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right),$$

$$\beta_1 = \frac{\frac{V_{DD} - 0.9}{R_2}}{\frac{V_{DD} - 0.9}{R_4} + \frac{V_{in} - 0.7}{R_1}}.$$

No obstante, es necesario analizar el último caso para seleccionar adecuadamente las resistencias.

Caso 4: Circuito desactivado – voltaje de entrada en baja

En este caso se presenta cuando se desactiva en voltaje de entrada V_{in} en el estado tres y debido al condensado el voltaje en el colector de primer transistor se mantiene por un instante de tiempo permitiendo que se cree un circuito cerrado entre este transistor y el segundo. Esto permite que los transistores sigan activados aun cuando no se encuentra activada la entra V_{in} . Así, en este estado la ganancia del primer transistor es máxima y se obtiene con $V_{in} = 0 V$ en la expresión obtenida en el tercer estado y tomando $R_1 = 10R_4$ ($R_1 \gg R_4$):

$$\beta_1 = \frac{\frac{V_{DD} - 0.9}{R_2}}{\frac{V_{DD} - 0.9}{R_4} - \frac{0.7}{R_1}} \approx \frac{R_4}{R_1}.$$

Para restringir esta ganancia se considerará $\beta_1 = 1$ con $R_4 = R_2$. Considerando $R_6 = R_2$, obtenemos las siguientes expresiones:

$$R_2 = R_4 = R_6 = \frac{R_3}{10} = \frac{R_5}{10} = \frac{R_1}{10}.$$

Se selecciona las resistencias comerciales $R_2 = 22 k\Omega$ y $R_1 = 200 k\Omega$ y se obtienen las siguientes corrientes y ganancias máximas en los transistores considerando $V_{in} = 3.3 V$:

$$I_{C_1} = 0.37 mA, I_{B_1} = 0.38 mA, \beta_1 = 0.97,$$

$$I_{C_2} = 0.41 mA, I_{B_2} = 0.37 mA, \beta_2 = 1.21,$$

$$I_{C_3} = 0.40 mA, I_{B_3} = 0.04 mA, \beta_3 = 9.87.$$

Se observa que todas las ganancias son menores a 100 por lo que se cumple con la condición.

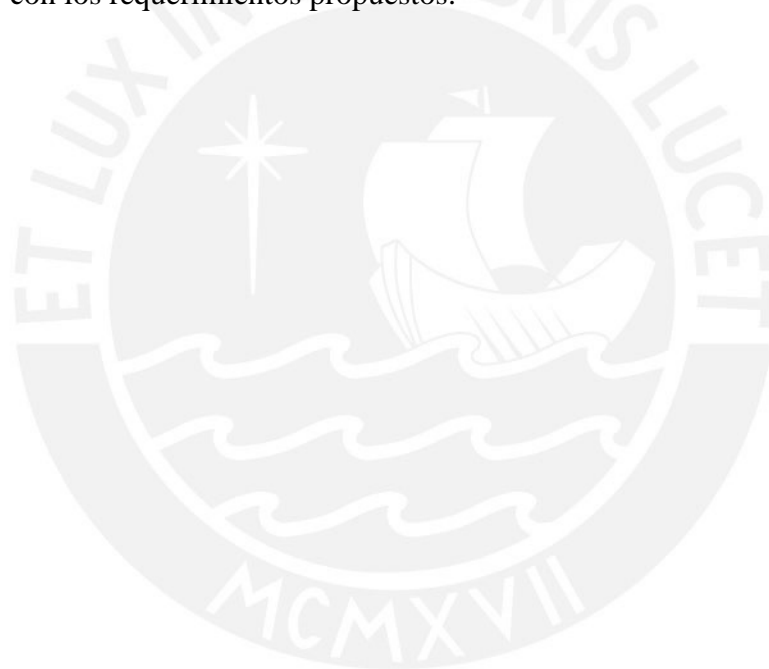
Por otra parte, para mantener el voltaje de activación en el circuito de control *latch*, se agrega un capacitor que mantenga el voltaje de activación del transistor Q_1 . El circuito resultante tiene la forma de un filtro pasa baja RC, por lo que se propone seleccionar el valor del capacitor tal que reduzca como mínimo al doble ($G = 0.5$) el ruido de señales de 50 Hz (frecuencia estándar de trabajo de los generadores de onda PWM). La resistencia de trabajo se obtiene al calcular la resistencia equivalente en paralelo de las resistencias R_2 , R_4 , R_5 y R_6 , obteniéndose $R_{eq} = 7.07 k\Omega$. Entonces, la ganancia de voltaje a través del filtro es la siguiente:

$$G(j\omega) = A \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega R_{eq} C_1)^2}}$$

Donde:

- A : Ganancia en cero del filtro, adimensional.
- ω : Frecuencia de señal de entrada, en rad/s.
- R_{eq} : Resistencia equivalente, en Ω .
- C_1 : Capacitor del filtro, en F.

Reemplazando $\omega = 50 \text{ Hz} = 314.16 \text{ rad/s}$, $R_{eq} = 7.07 \text{ k}\Omega$, $A = 1$ (el filtro no presenta desfase de ganancia) y despejando se obtiene $C_1 > 0.8 \mu\text{F}$. Se elige un condensador $C_1 = 1 \mu\text{F}$ para mantener el voltaje del emisor en el primer transistor y cumplir con los requerimientos propuestos.



B.14. Cálculo y selección de componentes del circuito de sensado de voltaje

Debido a que el voltaje lógico del ADC utilizado en el microcontrolador es de 3.3 V, es necesario reducir el voltaje de la batería para que se encuentre en el rango permitido. Esto se realiza por medio de un divisor de voltaje cuya expresión se presentó en el Anexo B.13. Así, debido a que es necesario convertir el voltaje máximo de la batería $V_i = 12.6 V$ al voltaje lógico permitido $V_o = 3.3 V$, se selecciona una resistencia de precisión comercial de $R_I = 12.1 k\Omega$ y se reemplaza en la expresión:

$$V_o = V_i \cdot \frac{R_I}{R_I + R_{II}}$$

$$3.3 = 12.6 \cdot \frac{12.1}{12.1 + R_{II}}$$

$$R_{II} = 34.1 k\Omega.$$

Debido a la dificultad de obtener resistencias de precisión comerciales del valor obtenido se opta por seleccionar dos resistencias $R_{II_1} = 33 k\Omega$ y $R_{II_2} = 1.1 k\Omega$.

Por otra parte, el circuito resultante es un filtro pasa baja (similar al circuito *latch* diseñado anteriormente), donde:

$$A = \frac{R_I}{R_I + R_{II_1} + R_{II_2}} = 0.26, R_{eq} = \frac{(R_{II_1} + R_{II_2})R_I}{R_I + R_{II_1} + R_{II_2}} = 8.93 k\Omega$$

En esta ocasión, se propone reducir la ganancia en un factor de 10 ($G = 0.1$) a las señales desde una frecuencia de 50 Hz para mejorar la precisión de medición del voltaje. Reemplazando los valores se obtiene $C_2 > 0.86 \mu F$, por lo que se elige un condensador $C_2 = 1 \mu F$ para mantener el voltaje a la entrada del ADC y cumplir con los requerimientos propuestos.

Además, el rango de voltaje de sensado final se encuentra entre 2.36 V y 3.30 V, se utiliza la siguiente expresión para obtener la resolución mínima en bits del ADC:

$$n \geq \log_2 \left(\frac{V_{lógico}}{(V_{máx} - V_{mín}) \cdot R_{\%}} \cdot 100 \right).$$

Donde:

- n : Resolución requerida del ADC, en bits.
- $V_{lógico}$: Voltaje lógico del ADC, en V.
- $V_{máx}$: Voltaje máximo de sensado, en V.
- $V_{mín}$: Voltaje mínimo de sensado, en V.
- $R_{\%}$: Resolución requerida de trabajo, en %.

Reemplazando $V_{lógico} = 3.3 V, V_{máx} = 3.3 V, V_{mín} = 2.36 V$ y $R_{\%} = 0.1\%$ obtenemos $n \geq 11.77 bits$. Finalmente, el microcontrolador seleccionado cuenta con una resolución de su ADC máxima de 12 bits, por lo que se selecciona esta como resolución de sensado.



ANEXO C: Códigos de programación

C.1. Algoritmo de registro de imágenes

```
import cv2
import time
import os

directory=r'/home/a123/Desktop/Renzo/Codes/LED/Images_4'
os.chdir(directory)
cam1=cv2.VideoCapture(0)
cam2=cv2.VideoCapture(1)
cam3=cv2.VideoCapture(3)

cam1.set(cv2.CAP_PROP_FOURCC, cv2.VideoWriter_fourcc(*"MJPG"))
cam2.set(cv2.CAP_PROP_FOURCC, cv2.VideoWriter_fourcc(*"MJPG"))
cam3.set(cv2.CAP_PROP_FOURCC, cv2.VideoWriter_fourcc(*"MJPG"))

cam2.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH,800)
cam2.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT,600)
cam1.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH,3840)
cam1.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT,2160)
cam3.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH,800)
cam3.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT,600)

while True:
    s2,img2=cam2.read()
    s3,img3=cam3.read()
    s1,img1=cam1.read()

    cv2.imshow("cam-test",img1)
    if cv2.waitKey(1000) & 0xFF == ord('s'):
        cam1.capture.release()
        cam2.capture.release()
        cam3.capture.release()
        cv2.destroyAllWindows()
        break
    else:
        cv2.imwrite(os.path.join(directory,str(i)+"_frontImage.jpg"),img1)
        cv2.imwrite(os.path.join(directory,str(i)+"_rightImage.jpg"),img2)
        cv2.imwrite(os.path.join(directory,str(i)+"_leftImage.jpg"),img3)
        i=i+1
```

C.2. Algoritmo de registro de datos del barómetro

```
#!/usr/bin/python
import ms5837
import time

sensor = ms5837.MS5837_30BA()

# Inicializamos el sensor antes de leer los datos
if not sensor.init():
    print("Sensor could not be initialized")
    exit(1)

# Lectura de los datos del sensor
if not sensor.read():
    print("Sensor read failed!")
    exit(1)

# Se muestra los valores sensados para confirmar su correcto funcionamiento
print("Pressure: "+ "{:.3f}".format(sensor.pressure(ms5837.UNITS_atm))+ " atm " +
      "{:.3f}".format(sensor.pressure(ms5837.UNITS_Torr))+ " Torr " +
      "{:.3f}".format(sensor.pressure(ms5837.UNITS_psi))+ " psi")

# Altitud relativa al nivel del mar
print("MSL Relative Altitude: "+ "{:.3f}".format(sensor.altitude())+" m")

# Pausa de 5 segundos
time.sleep(5)
t=None

# Creación del archivo .txt
f = open("datos.txt", "w")
f.write("Time, MSL Relative Altitude m, Pressure mbar, Pressure psi, Temperature °C, Temperature °F")

while True:
    if sensor.read():
        # Tiempo inicial
        if t==None:
            t=time.time()

        # Se muestran los valores sensados
        print("Time:"+ "{:.3f}".format(time.time()-t)+
              "P: "+ "{:.3f}".format(sensor.pressure())+" mbar " +
              "{:.3f}".format(sensor.pressure(ms5837.UNITS_psi))+ " psi\tT: " +
              "{:.3f}".format(sensor.temperature())+" C " +
              "{:.3f}".format(sensor.temperature(ms5837.UNITS_Fahrenheit))+ " F")

        # Registro de los datos obtenidos
        f.write('\n')
        f.write(str(time.time()-t)+", "+ # Tiempo transcurrido
                str(sensor.altitude())+", "+
                str(sensor.pressure())+", "+
                str(sensor.pressure(ms5837.UNITS_psi))+", "+
                str(sensor.temperature())+", "+
                str(sensor.temperature(ms5837.UNITS_Fahrenheit)))

        # El programa finaliza si el tiempo es mayor a 60 segundos
        if time.time()-t>=60.0:
            exit(1)
    else:
        print("Sensor read failed!")
        exit(1)
```

C.3. Algoritmo de control de iluminación – simplificado

```

import vision
import cv2
import time
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import os

# Manager
IO = vision.IOManager()

# Parámetros de control
n = 0
mu = 0
alpha = 0.6

eta = 1
i = 0.5

# Constantes de la función sigmoide
c1 = 7
c2 = 0.5

# Captura de video
camera = 0
cam = cv2.VideoCapture(camera)
_, img = cam.read()
cv2.imshow('img', img)
print("Waiting camera starting...")
if cv2.waitKey(10000) & 0xFF == ord('q'):
    pass

def sigmoid(err):
    return 100/(1+np.exp(-c1*(err-c2)))

def error(img, equ):
    err = sum(sum((equ/255.0)**eta-img/255.0))
    err = err/img.shape[0]/img.shape[1]
    err = alpha*err
    return err

start = time.time()

textFile = open("/home/a123/Desktop/Codes/Control/Control Adaptativo/data.txt", "w")
textFile.write("Brightness, Error, Control Signal")
textFile.write('\n')
textFile.close()

```

```
for i in range(101):
    _, img = cam.read()
    cv2.imshow('img', img)
    if cv2.waitKey(1000) & 0xFF == ord('q'):
        break
    cv2.imwrite(os.path.join("/home/a123/Desktop/Codes/Control/Control
Adaptativo/Images",str(i)+"img.jpg"),img)
    img = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    equ = cv2.equalizeHist(img)

    # Cálculo del error
    err = error(img, equ)
    u = sigmoid(err)

    IO.setOutput(vision.LIGHTS_BRIGHTNESS, i)
    IO.sendUART()
    print("Brightness: "+str(i)+", Error: "+str(err)+", Control: "+str(u))
    time.sleep(2)
    textFile = open("/home/a123/Desktop/Codes/Control/Control Adaptativo/data.txt", "a")
    textFile.write(str(i)+"; "+str(err)+" "+str(u))
    textFile.write('\n')
    textFile.close()

IO.setOutput(vision.LIGHTS_BRIGHTNESS, 0)
IO.sendUART()

cam.release()
```

C.4. Librería multiusuario para el control del sistema

```
#!/usr/bin/python3
# encoding: utf-8
# sudo modprobe spidev
# ls /dev/i2c* /dev/spi*

import time
import numpy as np
import digitalio
import board
import cv2
import os
import serial

time.sleep(1)

print("Waiting 10 seconds...")

time.sleep(0)

print("Starting...")

# Models
MODEL_02BA = 0
MODEL_30BA = 1

# Oversampling options
OSR_256 = 0
OSR_512 = 1
OSR_1024 = 2
OSR_2048 = 3
OSR_4096 = 4
OSR_8192 = 5

# kg/m^3 convenience
DENSITY_FRESHWATER = 997
DENSITY_SALTWATER = 1029

# Conversion factors (from native unit, mbar)
UNITS_Pa = 100.0
UNITS_hPa = 1.0
UNITS_kPa = 0.1
UNITS_mbar = 1.0
UNITS_bar = 0.001
UNITS_atm = 0.000986923
UNITS_Torr = 0.750062
UNITS_psi = 0.014503773773022
```

```

# Valid units
UNITS_Centigrade = 1
UNITS_Fahrenheit = 2
UNITS_Kelvin     = 3
mag_sens = 4900.0 # magnetometer sensitivity: 4800 uT

# Parameters
DIRECTORY           = "/home/a123/Desktop/Codes/Control/Data"
DIRECTORY_IMAGES    = "Images"
DIRECTORY_VARIABLES = "/Variables"
DIRECTORY_IMAGES    = "/Images"
PARAMETERS_TXT_DATA = "/Parameters_Data.txt"
VARIABLES_TXT_DATA  = "/Variables_Data.txt"
BASE_INDE×         = str(int(time.time()))
RIGHT_CAMERA_INDE×  = 1 #1, 0, 3, 0
CENTER_CAMERA_INDE× = 0 #0, 2, 2, 4
LEFT_CAMERA_INDE×   = 3 #3, 3, 0, 1
SCREEN_WIDTH        = 320
SCREEN_HEIGHT       = 240
LATERAL_CAMERA_WIDTH = 800
LATERAL_CAMERA_HEIGHT = 600
CENTRAL_CAMERA_WIDTH = 3840
CENTRAL_CAMERA_HEIGHT = 2160
UART_PORT           = "/dev/ttyTHS1"
UART_BYTESIZE      = serial.EIGHTBITS
UART_PARITY        = serial.PARITY_NONE
UART_STOPBITS      = serial.STOPBITS_ONE
GREEN_LED          = 0
RED_LED            = 1
BLUE_LED           = 2
LEAK               = 3
LIGHTS_BRIGHTNESS = 4
SWITCH_CAMERAS    = 6
SWITCH_LIGHTS     = 7
SWITCH_BRIGHTNESS = 8
LEAK_SENSOR       = 9
RIGHT              = 10
CENTER             = 11
LEFT              = 12
ALL               = 13
STARTING          = 14
WAITING           = 15
WARNING           = 16
HMI               = 17
LEFT_IMG_DIRECTORY = 18
CENTER_IMG_DIRECTORY = 19
RIGHT_IMG_DIRECTORY = 20
DATA_DIRECTORY    = 21

```

```

NORMAL          = 22
AUTOMATIC       = 23
SET_ON          = True
SET_OFF         = False
BRIGHTNESS_0   = 0
BRIGHTNESS_50  = 50
BRIGHTNESS_100 = 100
DELTA_TIME      = 0.1
MIN_BATTERY     = 50
RIGHT           = "right"
CENTER          = "center"
LEFT           = "left"
SIG_PROP_CONSTANT = 7
SIG_OFFSET_CONSTANT = 0.5
CONTROL_PROP_CONST = 0.5
CONTROL_INT_CONST = 0.5
EQU_REG_CONST  = 0.5
DEPTH_REG_CONST = 0.0
DEPTH_PROP_CONST = 0.0

# GPIO Jetson Nano
RIGHT_SWITCH = board.D6 # PIN 29
CENTER_SWITCH = board.D13 # PIN 31
LEFT_SWITCH  = board.D5 # PIN 33
LEAK_PIN     = board.D19 # PIN 35

# Baudrates
UART_BAUDRATE = 9600

class control(object):

    def __init__(self, directory = DIRECTORY, index = BASE_INDEX, sigProp =
SIG_PROP_CONSTANT,
                sigOff = SIG_OFFSET_CONSTANT, contProp = CONTROL_PROP_CONST, contInt =
CONTROL_INT_CONST,
                equReg = EQU_REG_CONST, depthReg = DEPTH_REG_CONST, depthProp =
DEPTH_PROP_CONST):

        print(directory)
        self._directory = directory
        self._indexDirectory = index
        self._dataIndex = 0
        self._sigProp = sigProp
        self._sigOff = sigOff
        self._contProp = contProp
        self._contInt = contInt
        self._equReg = equReg
        self._depthReg = depthReg
        self._depthProp = depthProp

```



```

self._dataDirectory = self._directory+"/Data "+self._indexDirectory
self._imagesDirectory = self._dataDirectory+DIRECTORY_IMAGES
self._variablesDirectory = self._dataDirectory+DIRECTORY_VARIABLES

os.mkdir(self._dataDirectory)
os.mkdir(self._imagesDirectory)
os.mkdir(self._variablesDirectory)

self._textFile = open(self._dataDirectory+PARAMETERS_TXT_DATA, "w")
self._textFile.write("eta, alpha, i, mu, theta, sigma proportional, sigma offset")
self._textFile.write('\n')
self._textFile.write(str(self._equReg)+" "+str(self._contProp)+",
"+str(self._contInt)+" "+
                        str(self._depthProp)+" "+str(self._depthReg)+" "+
"+str(self._sigProp)+" "+
                        str(self._sigOff))
self._textFile.close()

self._textFile = open(self._variablesDirectory+VARIABLES_TXT_DATA, "w")
self._textFile.write("error, integral error, control action")
self._textFile.write('\n')
self._textFile.close()

def getIndex(self):
    return self._dataIndex

def saveImage(self, img):
    self._imageName = str(self._dataIndex)+"_img.jpg"
    cv2.imwrite(os.path.join(self._imagesDirectory,self._imageName),img)

def saveData(self, err, errI, u):
    self._textFile = open(self._variablesDirectory+VARIABLES_TXT_DATA, 'a')
    self._textFile.write(str(err) + "," + str(errI) + "," + str(u))
    self._textFile.write('\n')
    self._textFile.close()

def updateIndex(self):
    self._dataIndex = self._dataIndex+1

def getGrayImage(self, img):
    return cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

def getEquImage(self, img):
    return cv2.equalizeHist(self.getGrayImage(img))

def sigmoid(self, err):
    return 1/(1+np.exp(-self._sigProp*(err-self._sigOff)))

def error(self, img, equ):

```

```

err = sum(sum((equ/255.0)**self._equReg-img/255.0))
err = self._err/img.shape[0]/img.shape[1]
return err

def control(self, err, err_acc, depth):
    return
100*self.sigmoid(self._contProp*err+self._contInt*err_acc+self._depthProp*depth**self._dep
thReg)

class IOManager(object):

    def __init__(self):
        self._uart = serial.Serial(
            port = UART_PORT,
            baudrate = UART_BAUDRATE,
            bytesize = UART_BYTESIZE,
            parity = UART_PARITY,
            stopbits = UART_STOPBITS,
        )

        self._batteryState = 100

        self._time = time.time()
        self._greenLed = True
        self._redLed = False
        self._blueLed = False
        self._lightsBrightness = 0

        self._switchCameras = digitalio.DigitalInOut(CENTER_SWITCH)
        self._switchCameras.switch_to_input(pull=digitalio.Pull.UP)
        self._switchCamerasValue = False

        self._switchLights = digitalio.DigitalInOut(RIGHT_SWITCH)
        self._switchLights.switch_to_input(pull=digitalio.Pull.UP)
        self._switchLightsValue = False

        self._switchBrightness = digitalio.DigitalInOut(LEFT_SWITCH)
        self._switchBrightness.switch_to_input(pull=digitalio.Pull.UP)
        self._switchBrightnessValue = False

        self._leakSensor = digitalio.DigitalInOut(LEAK_PIN)
        self._leakSensor.switch_to_input(pull=digitalio.Pull.DOWN)
        self._leakSensorValue = False

        self._blinkLed = False

    def readInputs(self):
        self._time = time.time()
        self._switchCamerasValue = True

```

```

self._switchLightsValue = True
self._switchBrightnessValue = True
while time.time() - self._time < DELTA_TIME:
    if not self._switchCameras.value == False: self._switchCamerasValue = False
    if not self._switchLights.value == False: self._switchLightsValue = False
    if not self._switchBrightness.value == False: self._switchBrightnessValue =
False

def readLeak(self):
    self._leakSensorValue = self._leakSensor.value

def setOutput(self, output, state):
    if output == GREEN_LED:
        self._greenLed = state
    if output == RED_LED:
        self._redLed = state
    if output == BLUE_LED:
        self._blueLed = state
    if output == LIGHTS_BRIGHTNESS:
        self._lightsBrightness = state

def getOutput(self, output):
    if output == GREEN_LED:
        return self._greenLed
    if output == RED_LED:
        return self._redLed
    if output == BLUE_LED:
        return self._blueLed
    if output == LIGHTS_BRIGHTNESS:
        return self._lightsBrightness

def getInput(self, input):
    if input == SWITCH_CAMERAS:
        return self._switchCamerasValue
    if input == SWITCH_LIGHTS:
        return self._switchLightsValue
    if input == SWITCH_BRIGHTNESS:
        return self._switchBrightnessValue
    if input == LEAK_SENSOR:
        return self._leakSensorValue

def runOutputs(self):
    self.setOutput(LIGHTS_BRIGHTNESS, self.getInput(SWITCH_LIGHTS)*(BRIGHTNESS_50*(not
self.getInput(SWITCH_BRIGHTNESS)) + BRIGHTNESS_100*self.getInput(SWITCH_BRIGHTNESS)))
    self.setOutput(BLUE_LED, self.getInput(SWITCH_CAMERAS))
    self.blinkRedLed()
    self.sendUART()

def runWarning(self):

```

```
self.setOutput(LIGHTS_BRIGHTNESS, BRIGHTNESS_0)
self.setOutput(GREEN_LED, SET_OFF)
self.setOutput(RED_LED, SET_ON)
self.setOutput(BLUE_LED, SET_OFF)
self.sendUART()

def blinkRedLed(self):
    if self._batteryState < MIN_BATTERY:
        self.setOutput(RED_LED, not self._blinkLed)
        self._blinkLed = not self._blinkLed
    else:
        self.setOutput(RED_LED, SET_OFF)

def sendUART(self):
    l = int(1100+self._lightsBrightness/100*(1900-1100))
    i =
self._leakSensorValue*2**7+self._blueLed*2**6+self._redLed*2**5+self._greenLed*2**4
    msg = int(bin(l<<8),2)+i
    self._uart.write(msg.to_bytes(3, 'big'))

def readUART(self):
    if self._uart.in_waiting > 0:
        self._batteryState = int.from_bytes(self._uart.read(), "big")
        return True
    else:
        return False

def getBatteryState(self):
    return self._batteryState
```

C.5. Algoritmo de generación de imagen para interfaz

```

import cv2
import numpy as np

# Variables
bat='78%'
z='1.5m'
mem='50%'
t='15min 48s'
# Lectura de la última imagen guardada
img = cv2.imread('image.jpg')
# Cambio de tamaño
p=min(240/img.shape[0], 320/img.shape[1])
width = int(img.shape[1]*p)
height = int(img.shape[0]*p)
dim = (width, height)
img = cv2.resize(img, dim, interpolation = cv2.INTER_AREA)
img2 = np.zeros((60,320,3))
img = np.append(img2.astype(np.uint8), img, 0)
scale=0.4
# Formato para hdmi
img = cv2.putText(img, 'Bateria', (60, 10), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
                  scale, (230, 230, 230), 1, cv2.LINE_AA)
img = cv2.putText(img, '78%', (70, 25), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
                  scale, (0, 255, 0), 1, cv2.LINE_AA)

img = cv2.putText(img, 'Profundidad', (45, 40), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
                  scale, (230, 230, 230), 1, cv2.LINE_AA)
img = cv2.putText(img, '1.5m', (63, 55), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
                  scale, (255, 204, 153), 1, cv2.LINE_AA)

img = cv2.putText(img, 'Memoria disponible', (180, 10), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
                  scale, (230, 230, 230), 1, cv2.LINE_AA)
img = cv2.putText(img, '50%', (225, 25), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
                  scale, (0, 255, 0), 1, cv2.LINE_AA)

img = cv2.putText(img, 'Tiempo de operacion', (175, 40), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
                  scale, (230, 230, 230), 1, cv2.LINE_AA)
img = cv2.putText(img, '15min 48s', (203, 55), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
                  scale, (204, 255, 255), 1, cv2.LINE_AA)

img = cv2.putText(img, 'Camara Principal', (0, 75), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
                  0.5, (51, 51, 51), 1, cv2.LINE_AA)
cv2.imwrite("img.jpg", img)
while not cv2.waitKey(0) & 0xFF == ord('q'):
    cv2.imshow('Image', img)

```

C.6. Algoritmo de control del microcontrolador

```

/* USER CODE BEGIN Header */
/**
 * *****
 * @file      : main.c
 * @brief     : Main program body
 * *****
 * @attention
 *
 * <h2><center>&copy; Copyright (c) 2021 STMicroelectronics.
 * All rights reserved.</center></h2>
 *
 * This software component is licensed by ST under BSD 3-Clause license,
 * the "License"; You may not use this file except in compliance with the
 * License. You may obtain a copy of the License at:
 *
 *          opensource.org/licenses/BSD-3-Clause
 * *****
 */
/* USER CODE END Header */
/* Includes -----*/
#include "main.h"

/* Private includes -----*/
/* USER CODE BEGIN Includes */

/* USER CODE END Includes */

/* Private typedef -----*/
/* USER CODE BEGIN PTD */

/* USER CODE END PTD */

/* Private define -----*/
/* USER CODE BEGIN PD */
/* USER CODE END PD */

/* Private macro -----*/
/* USER CODE BEGIN PM */

/* USER CODE END PM */

/* Private variables -----*/
ADC_HandleTypeDef hadc1;
DMA_HandleTypeDef hdma_adc1;

TIM_HandleTypeDef htim2;

UART_HandleTypeDef huart1;

/* USER CODE BEGIN PV */
uint8_t latch, blue, red, green;
uint8_t i;
uint8_t rx_buff[3];
uint8_t tx_buff[1]={0x64};
uint16_t pwm=1100;
uint16_t adc;

void HAL_UART_RxCpltCallback(UART_HandleTypeDef *huart){
    HAL_UART_Receive_IT(&huart1, rx_buff, sizeof rx_buff);
    pwm = (((uint16_t)rx_buff[0]) << 8) + (uint16_t)rx_buff[1];
    htim2.Instance->CCR1 = pwm;
    latch = rx_buff[2]&&0x80;
    blue = rx_buff[2]&&0x40;
    red = rx_buff[2]&&0x20;
    green = rx_buff[2]&&0x10;
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_4, latch);
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_1, blue);
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_2, red);
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_3, green);
}

```

```

/* USER CODE END PV */

/* Private function prototypes -----*/
void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_USART1_UART_Init(void);
static void MX_DMA_Init(void);
static void MX_ADC1_Init(void);
static void MX_TIM2_Init(void);
/* USER CODE BEGIN PFP */

/* USER CODE END PFP */

/* Private user code -----*/
/* USER CODE BEGIN 0 */

/* USER CODE END 0 */

/**
 * @brief The application entry point.
 * @retval int
 */
int main(void)
{
    /* USER CODE BEGIN 1 */

    /* USER CODE END 1 */

    /* MCU Configuration-----*/

    /* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the Systick. */
    HAL_Init();

    /* USER CODE BEGIN Init */

    /* USER CODE END Init */

    /* Configure the system clock */
    SystemClock_Config();

    /* USER CODE BEGIN SysInit */

    /* USER CODE END SysInit */

    /* Initialize all configured peripherals */
    MX_GPIO_Init();
    MX_USART1_UART_Init();
    MX_DMA_Init();
    MX_ADC1_Init();
    MX_TIM2_Init();
    /* USER CODE BEGIN 2 */
    HAL_TIM_PWM_Start(&htim2, TIM_CHANNEL_1);
    HAL_UART_Receive_IT(&huart1, rx_buff, sizeof rx_buff);
    HAL_ADC_Start(&hadc1);
    htim2.Instance->CCR1=pwm;
    /* USER CODE END 2 */

    /* Infinite loop */
    /* USER CODE BEGIN WHILE */
    while (1)
    {
        /* USER CODE END WHILE */
        HAL_Delay(500);
        HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, 200);
        adc=HAL_ADC_GetValue(&hadc1);
        i=adc*1.0/4000*100;
        tx_buff[0]=i*(i<100)+100*(i>=100);
        HAL_UART_Transmit(&huart1, tx_buff, sizeof tx_buff, 200);
        /* USER CODE BEGIN 3 */
    }
    /* USER CODE END 3 */
}

```

```

/**
 * @brief System Clock Configuration
 * @retval None
 */
void SystemClock_Config(void)
{
    RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct = {0};
    RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct = {0};
    RCC_PeriphCLKInitTypeDef PeriphClkInit = {0};

    /** Initializes the RCC Oscillators according to the specified parameters
     * in the RCC_OscInitTypeDef structure.
     */
    RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSE;
    RCC_OscInitStruct.HSEState = RCC_HSE_ON;
    RCC_OscInitStruct.HSEPredivValue = RCC_HSE_PREDIV_DIV1;
    RCC_OscInitStruct.HSIState = RCC_HSI_ON;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_ON;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSE;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLMUL = RCC_PLL_MUL9;
    if (HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
    /** Initializes the CPU, AHB and APB buses clocks
     */
    RCC_ClkInitStruct.ClockType = RCC_CLOCKTYPE_HCLK|RCC_CLOCKTYPE_SYSCLK
        |RCC_CLOCKTYPE_PCLK1|RCC_CLOCKTYPE_PCLK2;
    RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource = RCC_SYSCLKSOURCE_PLLCLK;
    RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;
    RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV2;
    RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;

    if (HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_2) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
    PeriphClkInit.PeriphClockSelection = RCC_PERIPHCLK_ADC;
    PeriphClkInit.AdcClockSelection = RCC_ADCCLK2_DIV6;
    if (HAL_RCCEx_PeriphCLKConfig(&PeriphClkInit) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
}

/**
 * @brief ADC1 Initialization Function
 * @param None
 * @retval None
 */
static void MX_ADC1_Init(void)
{
    /* USER CODE BEGIN ADC1_Init 0 */

    /* USER CODE END ADC1_Init 0 */

    ADC_ChannelConfTypeDef sConfig = {0};

    /* USER CODE BEGIN ADC1_Init 1 */

    /* USER CODE END ADC1_Init 1 */
    /** Common config
     */
    hadc1.Instance = ADC1;
    hadc1.Init.ScanConvMode = ADC_SCAN_DISABLE;
    hadc1.Init.ContinuousConvMode = ENABLE;
    hadc1.Init.DiscontinuousConvMode = DISABLE;
    hadc1.Init.ExternalTrigConv = ADC_SOFTWARE_START;
    hadc1.Init.DataAlign = ADC_DATAALIGN_RIGHT;
    hadc1.Init.NbrOfConversion = 1;
    if (HAL_ADC_Init(&hadc1) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
}

```



```

}
/** Configure Regular Channel
 */
sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_9;
sConfig.Rank = ADC_REGULAR_RANK_1;
sConfig.SamplingTime = ADC_SAMPLETIME_1CYCLE_5;
if (HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
/* USER CODE BEGIN ADC1_Init 2 */

/* USER CODE END ADC1_Init 2 */

}

/**
 * @brief TIM2 Initialization Function
 * @param None
 * @retval None
 */
static void MX_TIM2_Init(void)
{
    /* USER CODE BEGIN TIM2_Init 0 */

    /* USER CODE END TIM2_Init 0 */

    TIM_ClockConfigTypeDef sClockSourceConfig = {0};
    TIM_MasterConfigTypeDef sMasterConfig = {0};
    TIM_OC_InitTypeDef sConfigOC = {0};

    /* USER CODE BEGIN TIM2_Init 1 */

    /* USER CODE END TIM2_Init 1 */
    htim2.Instance = TIM2;
    htim2.Init.Prescaler = 72;
    htim2.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
    htim2.Init.Period = 20000;
    htim2.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
    htim2.Init.AutoReloadPreload = TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;
    if (HAL_TIM_Base_Init(&htim2) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
    sClockSourceConfig.ClockSource = TIM_CLOCKSOURCE_INTERNAL;
    if (HAL_TIM_ConfigClockSource(&htim2, &sClockSourceConfig) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
    if (HAL_TIM_PWM_Init(&htim2) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
    sMasterConfig.MasterOutputTrigger = TIM_TRGO_RESET;
    sMasterConfig.MasterSlaveMode = TIM_MASTERSLAVEMODE_DISABLE;
    if (HAL_TIMEx_MasterConfigSynchronization(&htim2, &sMasterConfig) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
    sConfigOC.OCMode = TIM_OCMODE_PWM1;
    sConfigOC.Pulse = 500;
    sConfigOC.OCpolarity = TIM_OCPOLARITY_HIGH;
    sConfigOC.OCFastMode = TIM_OCFAST_DISABLE;
    if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&htim2, &sConfigOC, TIM_CHANNEL_1) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
    /* USER CODE BEGIN TIM2_Init 2 */

    /* USER CODE END TIM2_Init 2 */
    HAL_TIM_MspPostInit(&htim2);
}

```

```

/**
 * @brief USART1 Initialization Function
 * @param None
 * @retval None
 */
static void MX_USART1_UART_Init(void)
{
    /* USER CODE BEGIN USART1_Init 0 */

    /* USER CODE END USART1_Init 0 */

    /* USER CODE BEGIN USART1_Init 1 */

    /* USER CODE END USART1_Init 1 */
    huart1.Instance = USART1;
    huart1.Init.BaudRate = 9600;
    huart1.Init.WordLength = UART_WORDLENGTH_8B;
    huart1.Init.StopBits = UART_STOPBITS_1;
    huart1.Init.Parity = UART_PARITY_NONE;
    huart1.Init.Mode = UART_MODE_TX_RX;
    huart1.Init.HwFlowCtl = UART_HWCONTROL_NONE;
    huart1.Init.OverSampling = UART_OVERSAMPLING_16;
    if (HAL_UART_Init(&huart1) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
    /* USER CODE BEGIN USART1_Init 2 */

    /* USER CODE END USART1_Init 2 */

}

/**
 * Enable DMA controller clock
 */
static void MX_DMA_Init(void)
{
    /* DMA controller clock enable */
    __HAL_RCC_DMA1_CLK_ENABLE();

    /* DMA interrupt init */
    /* DMA1_Channel1_IRQn interrupt configuration */
    HAL_NVIC_SetPriority(DMA1_Channel1_IRQn, 0, 0);
    HAL_NVIC_EnableIRQ(DMA1_Channel1_IRQn);
}

/**
 * @brief GPIO Initialization Function
 * @param None
 * @retval None
 */
static void MX_GPIO_Init(void)
{
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure = {0};

    /* GPIO Ports Clock Enable */
    __HAL_RCC_GPIOC_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOB_CLK_ENABLE();

    /*Configure GPIO pin Output Level */
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_1|GPIO_PIN_2|GPIO_PIN_3|GPIO_PIN_4, GPIO_PIN_RESET);

    /*Configure GPIO pins : PA1 PA2 PA3 PA4 */
    GPIO_InitStructure.Pin = GPIO_PIN_1|GPIO_PIN_2|GPIO_PIN_3|GPIO_PIN_4;
    GPIO_InitStructure.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
    GPIO_InitStructure.Pull = GPIO_NOPULL;
    GPIO_InitStructure.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
    HAL_GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStructure);
}

```

```

}

/* USER CODE BEGIN 4 */

/* USER CODE END 4 */

/**
 * @brief This function is executed in case of error occurrence.
 * @retval None
 */
void Error_Handler(void)
{
/* USER CODE BEGIN Error_Handler_Debug */
/* User can add his own implementation to report the HAL error return state */
__disable_irq();
while (1)
{
}
/* USER CODE END Error_Handler_Debug */
}

#ifdef USE_FULL_ASSERT
/**
 * @brief Reports the name of the source file and the source line number
 * where the assert_param error has occurred.
 * @param file: pointer to the source file name
 * @param line: assert_param error line source number
 * @retval None
 */
void assert_failed(uint8_t *file, uint32_t line)
{
/* USER CODE BEGIN 6 */
/* User can add his own implementation to report the file name and line number,
ex: printf("Wrong parameters value: file %s on line %d\r\n", file, line) */
/* USER CODE END 6 */
}
#endif /* USE_FULL_ASSERT */

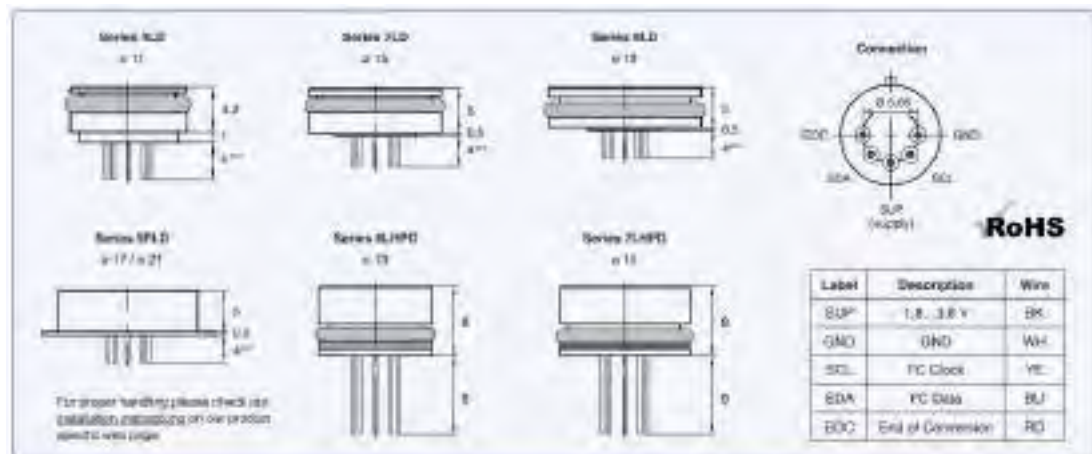
/***** (C) COPYRIGHT STMicroelectronics *****/

```

ANEXO D: Datos técnicos de componentes electrónicos

D.1. Sensor de Presión (barómetro)

D.1.1 Keller – Serie LD (4 – 9)



Accuracy ⁽¹⁾ max. $\pm 0,15$ %FS (600 bar $\pm 0,25$ %FS / 1000 bar $\pm 0,35$ %FS)
 Overpressure 4 x pressure range (max. 350 bar resp. 1200 bar for 6LHPD, 7LHPD)
 Long Term Stability typ. $\pm 0,1$ %FS, max. $\pm 0,2$ %FS (for pressure ranges < 1.5 bar: ± 3 mbar)

Type/Version	Dimensions [mm] ⁽²⁾	Pressure Range	Operating Temperature	Comp. Temp. Range	TEB ⁽³⁾ [%FS]
4LD	$\varnothing 11 \times 4,2$	3...200 bar abs. ⁽⁴⁾	-10...80 °C	0...50 °C	$\pm 0,7$ %FS
7LD	$\varnothing 15 \times 5$	3...200 bar abs. 3...30 bar rel. ⁽⁵⁾	-40...110 °C	0...50 °C -10...80 °C	$\pm 0,5$ %FS $\pm 0,7$ %FS
9LD	$\varnothing 19 \times 5$	1...200 bar abs. 1...30 bar rel.	-40...110 °C	0...50 °C	$\pm 0,5$ %FS
9FLO	$\varnothing 17 \times 5,5$ Flange $\varnothing 21$	1...30 bar abs. 1...30 bar rel.		-10...80 °C	$\pm 0,7$ %FS
6LHPD	$\varnothing 13 \times 8$	400...1000 bar abs.	-40...110 °C	0...50 °C	$\pm 0,7$ %FS
7LHPD	$\varnothing 15 \times 8$			-10...80 °C	$\pm 1,0$ %FS

⁽¹⁾ Linearity best straight line@RT, hysteresis, repeatability

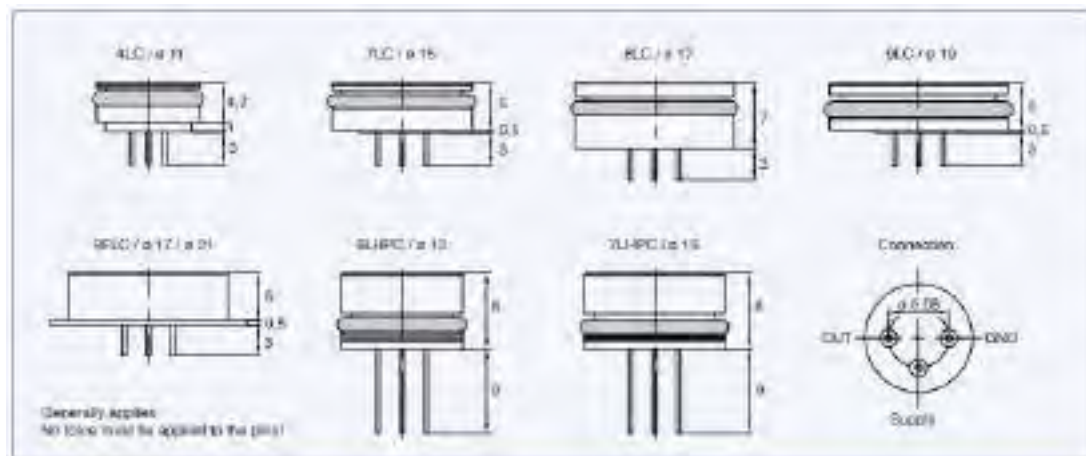
⁽²⁾ TEB (Total Error Band): Maximum deviation within specified pressure and compensated temperature range

⁽³⁾ abs: Absolute Pressure Measurement (PAA); Reference pressure at 0 bar abs. (vacuum) PA: Reference pressure at 1 bar abs.)

⁽⁴⁾ rel: Referential version (PR: Reference pressure at ambient pressure)

⁽⁵⁾ Dimensions without glass feed through

D.1.2 Keller – Serie LC (4 – 9)



Accuracy*

max. $\pm 0,25$ %FS

* Linearity best straight line @ HT, hysteresis, repeatability

Overpressure

2,5 x pressure range,

max. 300 bar resp. 1200 bar (6LHPC, 7LHPC)

Long Term Stability

max. $\pm 0,3$ %FS

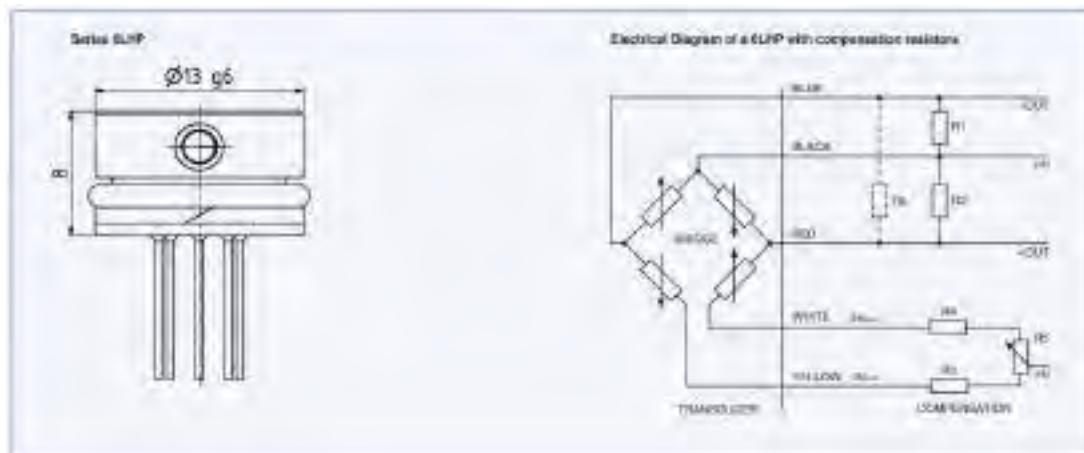
Type/ Version	Dimensions [mm]	Pressure Range	Operating Temperature	Comp. Temp. Range	TEB ⁽¹⁾ [%FS]
4LC	ø 11 x 4,2	3...200 bar abs. ⁽²⁾	-10...+80 °C	0...50 °C	$\pm 1,0$ %FS
7LC	ø 15 x 5	2...200 bar abs. 2...30 bar rel. ⁽³⁾	-40...+125 °C	-10...80 °C -40...+125 °C	$\pm 1,0$ %FS $\pm 2,0$ %FS
8LC	ø 17 x 7	1...200 bar abs.	-40...+150 °C	-10...80 °C	$\pm 0,8$ %FS
9LC	ø 19 x 5	1...30 bar rel.		-40...+125 °C	$\pm 1,5$ %FS
9FLC	ø 17 x 5,5 Flange ø 21	1...50 bar abs. 1...30 bar rel.		-40...+150 °C (only > 3 bar)	$\pm 2,5$ %FS
6LHPC	ø 13 x 8	200...1000 bar	-40...+150 °C	-10...80 °C	$\pm 0,8$ %FS
7LHPC	ø 15 x 8		-40...+150 °C	-40...+150 °C	$\pm 2,0$ %FS

⁽¹⁾ TEB (Total Error Band) Maximum deviation within specified pressure and compensated temperature range

⁽²⁾ abs: Absolute Pressure Measurement (PAA; Absolute, Zero at vacuum) PA: Sealed Gauge, Zero at 1,0 bar abs.)

⁽³⁾ rel: Referential version (PR: Vented Gauge, Zero at atmospheric pressure)

D.1.3 Keller – Serie 6LHP



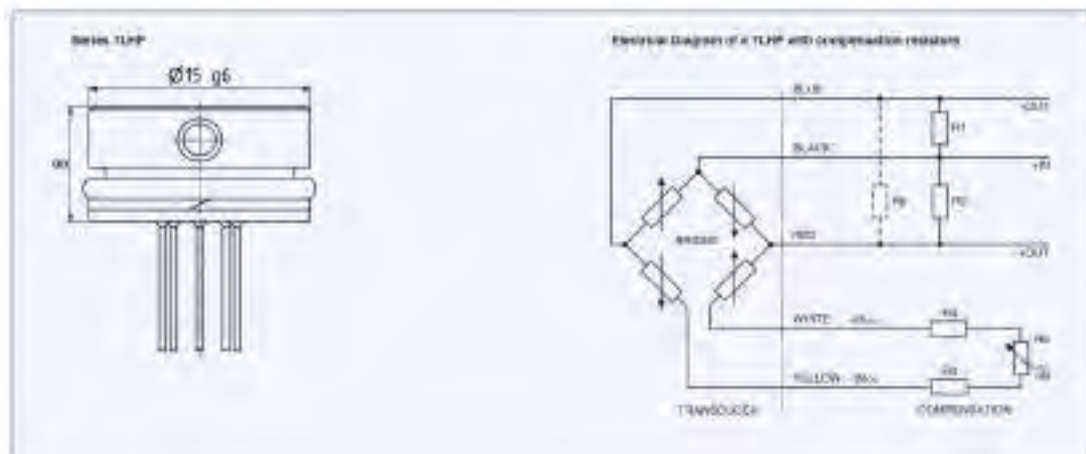
Standard pressure ranges

Absolute pressure	Absolute pressure	Gauge pressure	Sensitivity		
PA	PA		min	typ	max
0...100	0...100	250	1.80	1.80	2.0
0...160	0...160	450	0.75	1.00	1.25
0...250	0...250	650	0.48	0.84	0.98
0...400	0...400	1000	0.30	0.40	0.50
0...600	0...600	1500	0.20	0.267	0.333
0...1000	0...1000	2000	0.12	0.16	0.20
0...1500	0...1500	2500	0.075	0.10	0.125
0...2000	0...2000	3000	0.075	0.10	0.125
bar abs	bar abs	bar	mV/(mA x bar)		
Reference pressure at 0 bar abs (vacuum)	Reference pressure at 1 bar abs	Based on reference pressure	The standard pressure ranges are available from the warehouse. Calibration to any intermediate pressure ranges can also be made.		

Performance

Accuracy @ RT (20...25 °C)	± 0.25 %FS typ ± 0.50 %FS max	Non-linearity (best fitted straight line: BFL), pressure hysteresis, non-repeatability
Offset @ RT (20...25 °C)	± 25 mV/mA ± 2 mV/bar	Uncompensated, the sensitivity value must be added for PA Compensated with RG or FG
Compensated temperature range	-10...50 °C	Other temperature ranges between -40...150 °C are possible as an option
Long-term stability	± 0.25 %FS	Per year under reference conditions
Degree of dependency on location	± 2 mV	Calibrated in vertical installation position with metal diaphragm facing downwards
Temperature coefficient (TC)	± 0.025 %FS/°C	Zero (TCZero) pre-compensated with R1 or FG
	± 0.02 %/°C	Sensitivity (TCSens)
	1000...3000 ppm/°C	Total bridge resistance (TCResistor)

D.1.4 Keller – Serie 7LHP



Standard pressure ranges

Absolute pressure PSIA	Absolute pressure PSIA	Proof pressure	Sensitivity		
			FS	FS	FS
0...150	0...100	350	1.25	1.40	0.2
0...180	0...130	450	0.75	1.40	1.25
0...250	0...200	625	0.48	0.98	0.80
0...400	0...400	1000	0.28	0.40	0.50
0...600	0...600	1500	0.20	0.287	0.333
0...1000	0...1000	2250	0.12	0.18	0.20
0...1500	0...1500	3500	0.075	0.10	0.125
0...3000	0...3000	3000	0.025	0.10	0.125
bar abs.	bar abs.	bar	mV/(mA × bar)		
Reference pressure at 0.207 atm. (vacuum)	Reference pressure at 1 bar abs.	(proof or reference pressure)	These standard pressure ranges are available from the warehouse. Customised or any intermediate pressure ranges can also be made.		

Performance

Accuracy @ RT (20...25 °C)	± 0.25 %FS typ ± 0.50 %FS max	Non-linearity (best fitted straight line BPL); pressure hysteresis; non-repeatability
Offset @ RT (20...25 °C)	± 25 mV/mA < 2 mV/mA	Uncompensated, the sensitivity value must be added for PA Compensated with FS or FW
Compensated temperature range	-10...80 °C	Other temperature ranges between -55...150 °C are possible as an option
Long-term stability	± 0.25 %FS	Per year under reference conditions
Degree of dependency on location	± 2 mbar	Calibrated in vertical installation position with metal diaphragm facing downwards
Temperature coefficient (TC)	± 0.025 %FS/K	Zero (TCZero) pre-compensated with R1 or R2
	± 0.02 %/K	Sensitivity (TCsens)
	1000...3000 ppm/K	Total bridge resistance (TCres)

D.1.5 MS5837-30BA – Bar30

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Parameter	Symbol	Conditions		Min.	Typ.	Max	Unit
Operating Supply voltage	V _{DD}			1.5	3.0	3.6	V
Operating Temperature	T			-20	+25	+85	°C
Supply current (1 sample per sec.)	I _{DD}	OSR	8192		20.09		µA
			4096		10.05		
			2048		5.02		
			1024		2.51		
			512		1.26		
256		0.63					
Peak supply current		during conversion			1.25		mA
Standby supply current		at 25°C (V _{DD} = 3.0V)			0.01	0.1	µA
Power supply hold off for internal reset ⁽²⁾		V _{DD} < 0.1V		200			ms
VDD Capacitor		From V _{DD} to GND		100	470		nF

(1): Supply voltage power up must be continuous from GND to VDD without any sleep

ANALOG DIGITAL CONVERTER (ADC)

Parameter	Symbol	Conditions		Min.	Typ.	Max	Unit
Output Word					24		bit
Conversion time ⁽⁴⁾	t _c	OSR	8192	14.80	16.44	18.08	ms
			4096	7.40	8.22	9.04	
			2048	3.72	4.13	4.54	
			1024	1.88	2.08	2.28	
			512	0.95	1.06	1.17	
256	0.48	0.54	0.60				

(4): Maximum values must be used to determine waiting times in I2C communication

PRESSURE OUTPUT CHARACTERISTICS (V_{DD} = 3 V, T = 25°C UNLESS OTHERWISE NOTED)

Parameter	Conditions		Min.	Typ.	Max	Unit	
Operating Pressure Range		P _{range}	0		30	bar	
Absolute Accuracy ⁽¹⁾⁽²⁾ Temperature range: 0 ... 45°C	Version -01	0 ... 6 bar	-50		+50	mbar	
	Version -25		-75		+75	mbar	
Absolute Accuracy ⁽¹⁾⁽²⁾ Temperature range: 0 ... 45°C		0 ... 20 bar	-100		+100	mbar	
		0 ... 30 bar	-200		+200	mbar	
Absolute Accuracy ⁽¹⁾⁽²⁾ Temperature range: -20 ... 85°C	Version -01	0 ... 6 bar	-100		+100	mbar	
	Version -25		-150		+150	mbar	
Absolute Accuracy ⁽¹⁾⁽²⁾ Temperature range: -20 ... 85°C		0 ... 20 bar	-200		+200	mbar	
		0 ... 30 bar	-400		+400	mbar	
Maximum error with supply voltage ⁽²⁾	Version -01	V _{DD} = 1.5 V ... 3.6 V		±30		mbar	
	Version -25			±75		mbar	
Long-term stability				±30		mbar/yr	
Reflow soldering impact IPC/JEDEC J-STD-020C	Version -01			±8		mbar	
	Version -25			±30		mbar	
Recovering time after reflow ⁽³⁾				7		days	
Resolution RMS		OSR	8192		0.20		mbar
			4096		0.28		
			2048		0.38		
			1024		0.54		
			512		0.84		
256		1.57					

(1) With autozero at one pressure point

(2) With autozero at 3V point

(3) Time to recover at least 99% of the reflow impact.

(4) Windy cycle: sensor must be dried typically once a day

D.2. Unidad de medición inercial (IMU)

D.2.1 MPU-9250

3.1 Gyroscope Specifications

Typical Operating Circuit of section 4.2, VDD = 2.5V, VDDIO = 2.5V, T_a=25°C, unless otherwise noted

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Full-Scale Range	FS_SEL=0		±250		°/s
	FS_SEL=1		±500		°/s
	FS_SEL=2		±1000		°/s
	FS_SEL=3		±2000		°/s
Gyroscope ADC Word Length			16		bits
Sensitivity Scale Factor	FS_SEL=0		131		LSB/(°/s)
	FS_SEL=1		65.5		LSB/(°/s)
	FS_SEL=2		32.8		LSB/(°/s)
	FS_SEL=3		16.4		LSB/(°/s)
Sensitivity Scale Factor Tolerance	25°C		±0		%
Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±4		%
Nonlinearity	Best fit straight line, 25°C		±0.1		%
Cross-Axis Sensitivity			±2		%
Initial ZRO Tolerance	25°C		±5		°/s
ZRO Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±30		°/s
Total RMS Noise	DLPCFG=2 (50Hz)		0.1		°/s_rms
Rate Noise Spectral Density			0.01		°/s/√Hz
Gyroscope Nominal Frequencies		25	27	29	KHz
Low Pass Filter Response	Programmable Range	0		250	Hz
Gyroscope Startup Time	From Sleep mode		35		ms
Output Data Rate	Programmable, normal mode	4		8000	Hz

3.2 Accelerometer Specifications

Typical Operating Circuit of section 4.2, VDD = 2.5V, VDDIO = 2.5V, T_a=25°C, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Full-Scale Range	AFS_SEL=0		±2		g
	AFS_SEL=1		±4		g
	AFS_SEL=2		±8		g
	AFS_SEL=3		±16		g
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		bits
Sensitivity Scale Factor	AFS_SEL=0		16,384		LSB/g
	AFS_SEL=1		8,192		LSB/g
	AFS_SEL=2		4,096		LSB/g
	AFS_SEL=3		2,048		LSB/g
Initial Tolerance	Component-Level		±0		%
Sensitivity Change vs. Temperature	-40°C to +85°C, AFS_SEL=0, Component-Level		±0.020		%/°C
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		±0.5		%
Cross-Axis Sensitivity			±2		%
Zero-G Initial Calibration Tolerance	Component-Level, X, Y		±60		mg
	Component-Level, Z		±80		mg
Zero-G Level Change vs. Temperature	-40°C to +85°C		±1.5		mg/°C
Noise Power Spectral Density	Low noise mode		300		μg ² /Hz
Total RMS Noise	DLPCFG=2 (64Hz)			8	mg_rms
Low Pass Filter Response	Programmable Range	0		200	Hz
Intelligence Function Increment			4		mg/LSB
Accessories Startup Time	From Sleep mode		20		ms
	From Cold Start, 3rd V _{DD} ramp		30		ms
Output Data Rate	Low power (duty-cycled)	0.24		500	Hz
	Duty-cycled, over temp		±15		%
	Low noise (active)	4		8000	Hz

3.3 Magnetometer Specifications

Typical Operating Circuit of section 4.2, VDD = 2.5V, VDDIO = 2.5V, T_a=25°C, unless otherwise noted

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
MAGNETOMETER SENSITIVITY					
Full-Scale Range			±4800		μT
ADC Word Length			14		bits
Sensitivity Scale Factor			0.6		μT/LSB
ZERO-FIELD OUTPUT					
Initial Calibration Tolerance			±500		LSB

D.2.2 BNO055

OPERATING CONDITIONS ACCELEROMETER						
Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Units
Accelerability Range	±1g	Selectable via serial digital interface		±2		g
	±2g			±4		g
	±4g			±8		g
	±8g			±16		g
OUTPUT SIGNAL ACCELEROMETER (ACCELEROMETER ONLY MODE)						
Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Units
Sensitivity	S	All g_{axis} Values, $T_a=25^{\circ}\text{C}$		1		$\mu\text{S/mg}$
Sensitivity Tolerance	S_{tol}	$T_a=25^{\circ}\text{C}$, g_{axis}		±1	±4	%
Sensitivity Temperature Drift	TCS	g_{axis} Nominal V_{DD} supply, Temp. operating conditions		±0.03		%/K
Sensitivity Supply Volt. Drift	S_{SV}	g_{axis} , $T_a=25^{\circ}\text{C}$, $V_{DDmin} < V_{DD} < V_{DDmax}$		0.065	0.2	%/V
Zero-g Offset (x,y,z)	OFF _{x/y/z}	g_{axis} , $T_a=25^{\circ}\text{C}$, nominal V_{DD} supply, over life-time	-150	-100	+150	µg
Zero-g Offset Temperature Drift	TCO	g_{axis} Nominal V_{DD} supply		±1	±3.5	mg/K
Zero-g Offset Supply Volt. Drift	OFF _{SV}	g_{axis} , $T_a=25^{\circ}\text{C}$, $V_{DDmin} < V_{DD} < V_{DDmax}$		1.5	2.0	mg/V
Bandwidth	bw	2 nd order filter, bandwidth programmable		0		Hz
	bw16			16		Hz
	bw31			31		Hz
	bw63			63		Hz
	bw125			125		Hz
	bw250			250		Hz
	bw500			500		Hz
	bw1000			1,000		Hz
Nonlinearity	NL	best fit straight line, g_{axis}		0.5	2	%FS
Output Noise Density	n_{out}	g_{axis} , $T_a=25^{\circ}\text{C}$ Nominal V_{DD} supply Normal noise		150	190	$\mu\text{g}^2/\text{Hz}$
MECHANICAL CHARACTERISTICS ACCELEROMETER						
Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Units
Cross Axis Sensitivity	CAS	relative contribution between any two of the three axes		1	2	%
Alignment Error	E _a	relative to package outline		0.5	2	°

OPERATING CONDITIONS GYROSCOPE						
Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Rate Range	R_{min}	Selectable via serial digital interface		125		%
	R_{nom}			250		%
	R_{max}			500		%
	R_{min}			1,000		%
	R_{max}			2,000		%
OUTPUT SIGNAL GYROSCOPE (GYRO ONLY MODE)						
Sensitivity via register Map	S	$T_A=25^\circ\text{C}$		16.0 900		LSB/s rad/s
Sensitivity tolerance	S_{tol}	$T_A=25^\circ\text{C}$, R_{nom}	-	± 1	± 3	%
Sensitivity Change over Temperature	TCS	Nominal V_{DD} supplies $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$, R_{nom}		± 0.03	± 0.07	%/K
Sensitivity Supply Volt. Diff	S_{var}	$T_A=25^\circ\text{C}$, $V_{DDmin} \leq V_{DD} \leq V_{DDmax}$		< 0.1		%/V
Nonlinearity	NL	best fit straight line R_{min} to R_{max}		± 0.05	± 0.2	%FS
Zero-rate Offset	DRG, $O_{y,low}$, O_z	Nominal V_{DD} supplies $T_A=25^\circ\text{C}$, Slow and fast offset cancellation off	-3	± 1	± 3	%
Zero-rate Offset Change over Temperature	TCD	Nominal V_{DD} supplies $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$, R_{nom}		± 0.03	± 0.03	% per K
Zero-rate Offset Supply Volt. Diff	DRG $_{var}$	$T_A=25^\circ\text{C}$, $V_{DDmin} \leq V_{DD} \leq V_{DDmax}$		0.1		%/V
Output Noise	τ_{noise}	rms, BW=1 kHz (@ 0.0147V/LSB)		0.1	0.3	%
Bandwidth BW	f_{cut}			523 230 116 64 47 32 23 12		Hz
MECHANICAL CHARACTERISTICS GYROSCOPE						
Cross Axis Sensitivity	CAS	Sensitivity to stimuli in non-sense direction		± 1	± 3	%
OPERATING CONDITIONS MAGNETOMETER (MAGNETOMETER ONLY MODE)						
Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Units
Magnetic field range ¹	Brq _{xy}	$T_A=25^\circ\text{C}$	± 1200	± 1300		μT
	Brq _z		± 2000	± 2500		μT
Magnetometer heading accuracy ²	As heading	30 μT horizontal geomagnetic field component, $T_A=25^\circ\text{C}$			± 2.5	deg
MAGNETOMETER OUTPUT SIGNAL						
Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Device Resolution	D_{out}	$T_A=25^\circ\text{C}$		0.3		μT
Gain error ³	G_{gain}	After API compensation $T_A=25^\circ\text{C}$		± 5	± 8	%
Sensitivity Temperature Drift	TCS _m	After API compensation $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ Nominal V_{DD} supplies		± 0.01	± 0.03	%/K
Zero-B offset	OFF _m	$T_A=25^\circ\text{C}$		± 40		μT
Zero-B offset ⁴	OFF _{m,cal}	After calibration in fusion mode $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$		± 2		μT
Zero-B offset Temperature Drift	TCD _m	$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$		± 0.23	± 0.37	$\mu\text{T}/\text{K}$
Full-scale Nonlinearity	NL _{m, r1}	best fit straight line			1	%FS

D.2.3 MinIMU-9 v5

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ. ⁽¹⁾	Max.	Unit	
LA_FS	Linear acceleration measurement range			±2		g	
				±4			
				±8			
				±16			
G_FS	Angular rate measurement range			±125		dps	
				±245			
				±500			
				±1000			
LA_So	Linear acceleration sensitivity	FS = ±2		0.061		mg/LSB	
				FS = ±4			0.122
				FS = ±8			0.244
				FS = ±16			0.488
G_So	Angular rate sensitivity	FS = ±125		4.375		mcp/LSB	
				FS = ±245			8.75
				FS = ±500			17.50
				FS = ±1000			35
G_So	Angular rate sensitivity	FS = ±2000		70		mcp/LSB	
				FS = ±1000			35
				FS = ±500			17.50
				FS = ±245			8.75
LA_SoDr	Linear acceleration sensitivity change vs. temperature ⁽²⁾	from -40° to +85° delta from T=25°		±1		%	
G_SoDr	Angular rate sensitivity change vs. temperature ⁽²⁾	from -40° to +85° delta from T=25°		±1.5		%	
LA_TyOff	Linear acceleration typical zero-g level offset accuracy ⁽³⁾			±40		mg	
G_TyOff	Angular rate typical zero-rate level ⁽²⁾			±10		dps	
LA_OffDr	Linear acceleration zero-g level change vs. temperature ⁽²⁾			±0.5		mg/°C	
G_OffDr	Angular rate typical zero-rate level change vs. temperature ⁽²⁾			±0.05		dps/°C	
Rn	Rate noise density			7		mcp/s/√Hz	
An	Acceleration noise density	FS = ±2 g ODR = 104 Hz		90		µg/√Hz	
LA_ODR	Linear acceleration output data rate			13		Hz	
				26			
				52			
				104			
				208			
				416			
				833			
				1666			
G_ODR	Angular rate output data rate			13		Hz	
				26			
				52			
				104			
				208			
				416			
Top	Operating temperature range			-40		°C	
				+85			

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ. ⁽¹⁾	Max.	Unit
FS	Measurement range			±4		gauss
				±8		
				±12		
				±16		
GN	Sensitivity	FS=±4 gauss		6042		LSB/ gauss
		FS=±8 gauss		3421		
		FS=±12 gauss		2281		
		FS=±16 gauss		1711		
Zgauss	Zero-gauss level	FS=±4 gauss		±1		gauss
RMS	RMS noise	X-axis: FS=±12 gauss: Ultra-high-performance mode		3.2		mgauss
		Y-axis: FS=±12 gauss: Ultra-high-performance mode		3.2		mgauss
		Z-axis: FS=±12 gauss: Ultra-high-performance mode		4.1		mgauss
NL	Non-linearity	Best-fit straight line FS = ±12 gauss Happed = ±6 gauss		±0.12		%FS
ST	Self test ⁽²⁾	X-axis FS = ±12 gauss	1		3	gauss
		Y-axis FS = ±12 gauss	1		3	
		Z-axis FS = ±12 gauss	0.1		1	
DF	Magnetic disturbance field	Zero-gauss offset starts to degrade			50	gauss
Temp	Operating temperature range:		-40		+85	°C

D.2.4 UM7-LT

ATTITUDE AND HEADING SPECIFICATIONS

EKF Estimation Rate	500 Hz
Static Accuracy – Pitch and Roll	Pitch & Roll $\pm 1^\circ$, typical*
Dynamic Accuracy – Pitch and Roll	Pitch & Roll $\pm 3^\circ$, typical*
Static Accuracy – Yaw	Yaw $\pm 3^\circ$, typical*
Dynamic Accuracy – Yaw	Yaw $\pm 5^\circ$, typical*
Repeatability	0.5°
Resolution	< 0.01°

* Accuracy specifications depend on a variety of factors including the presence or lack of optional calibration and properties of the physical system being measured.

GYRO SPECIFICATIONS

Sensitivity change vs. temperature*	$\pm 0.004\%/^\circ\text{C}$
Bias change vs. temperature*	$\pm 20^\circ/\text{s}$ from -40°C to $+85^\circ\text{C}$
Rate noise density	$0.0005^\circ/\text{s}/\text{rtHz}$
Total RMS noise	$0.06^\circ/\text{s-rms}$
Non-linearity	0.2% FS
Dynamic range	$\pm 2000^\circ/\text{s}$
Cross-axis sensitivity	$\pm 2\%$
Nonlinearity	0.2%
Mechanical frequency – x-axis	33 kHz nominal
Mechanical frequency – y-axis	30 kHz nominal
Mechanical frequency – z-axis	27 kHz nominal

* Maximum change without calibration. Improved performance can be obtained with calibration.

ACCELEROMETER SPECIFICATIONS

Sensitivity change vs. temperature*	$\pm 0.02\%/^\circ\text{C}$
Bias change vs. temperature (X, Y)*	$\pm 0.75\text{mg}/^\circ\text{C}$
Bias change vs. temperature (Z)*	$\pm 1.50\text{mg}/^\circ\text{C}$
Rate noise density	$400\mu\text{g}/\text{rtHz}$
Dynamic range	$\pm 8\text{g}$

* Maximum change without calibration. Improved performance can be obtained with calibration.

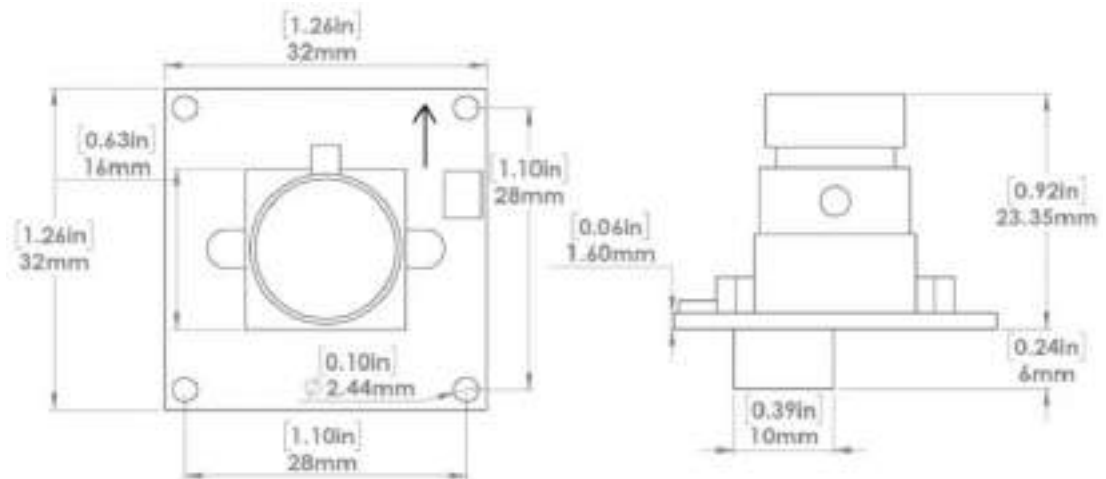
MAGNETOMETER SPECIFICATIONS

Dynamic range	$\pm 1200\mu\text{T}$
Initial scale factor tolerance*	$\pm 4\%$
Initial bias tolerance*	$\pm 300\mu\text{T}$

* Initial bias and scale factor errors are removed via soft and hard-iron calibration. Temperature-dependent bias and scale factor errors removable with optional calibration.

D.3. Cámaras secundarias – laterales

D.3.1 Low-light HD USB camera



Parameter	Value	
Physical		
Camera PCB Dimensions	32mm x 32mm	
Mounting Hole Spacing	28mm x 28mm	
Connector	J27FH to USB	
Working Temperature	-35 ~ 75°C	
Mass (total)	17g	0.6 oz
Mass (without cable)	13.5g	0.48 oz
Lens		
Mount Type	M12 x 0.5	
Field of View (Horizontal)	80°	
Field of View (Vertical)	64°	
Focal Length	2.87 mm	
Sensor		
Type	Sony Exmor R/IMX222 / IMX223	
Format	1/2.9"	
Pixel Size	0.9µm (H) x 0.8µm (V)	
Distortion	%	
Total pixels	2080(H) x 1521(V)	~2.24MP
Effective pixels	1920(H) x 1080(V)	~2.07MP
Minimum Illumination	0.01 lux	
Sensitivity	50V/luxsec@500nm	
Recording		
Standard	H.264	
Compression format	H.264 / MJPEG / YUV2 (YUV)	
Electrical		
Supply Voltage	5 volts	
Max Power (Draw)	200mW	

D.3.2 Low-light WDR USB camera



ArduCam
Low Light USB Camera
Module with Metal Case

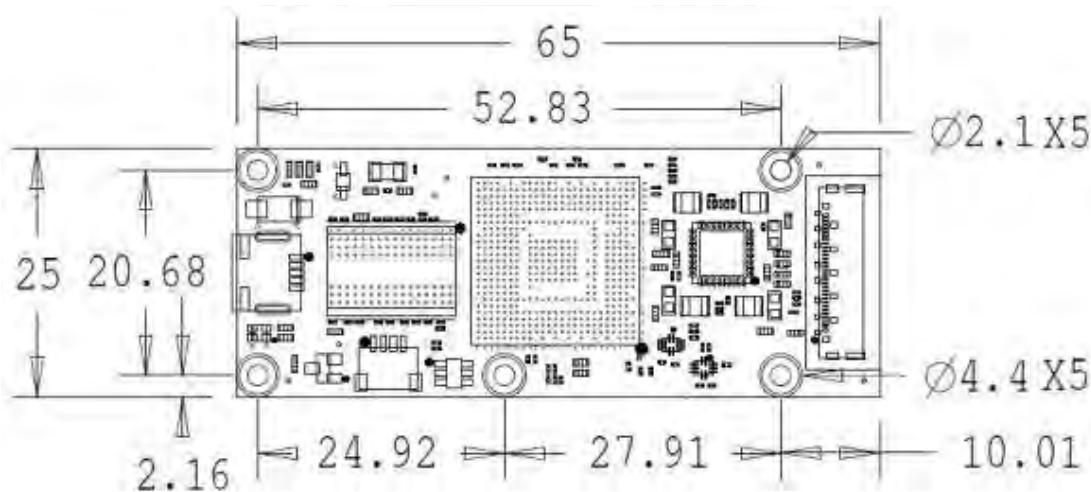
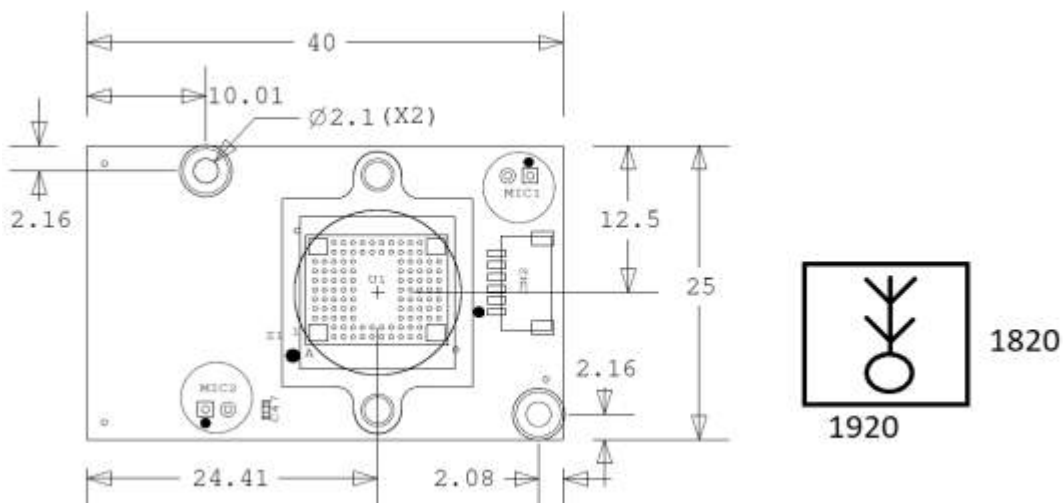
2MP Sony IMX291
(SKU: 8020101)
QUICK START GUIDE

SPECS

Camera	
Sensor	1/2.8" IMX291
Resolution	2MP (1945H x 1100V)
Data Format	MJPEG/YUY2/H.264
Dynamic Range	80 dB
Minimum Range	0.001 Lux
Frame rate	MJPEG 30fps@1080P; YUY2 30fps@640 x 360; H.264 30fps@1920 x 1080
Lens	
Field of View (FOV)	D=120°
Lens Mount	M12
Focusing Range	3.3R (1M) to infinity
IR Sensitivity	Integral IR filter, visible light only
Functionality and Compatibility	
Auto Controlled Features	Contrast/ Saturation/ Exposure / White balance / Acutance
Audio	Dual microphones
System Compatibility	Win7/8/10, Linux and Mac with UVC (Android compatibility, contact us for support.)
Power	
Power Supply	DC 5V
Working Current	MAX 300mA
Physical	
Operating Temp.	-4°F--167°F (-20°C--75°C)
Dimension	36x44x13mm
Connector No.	ZHR-4
Cable Length	3.3R (1M)

MCMXVII

D.3.3 e-CAM22_USB

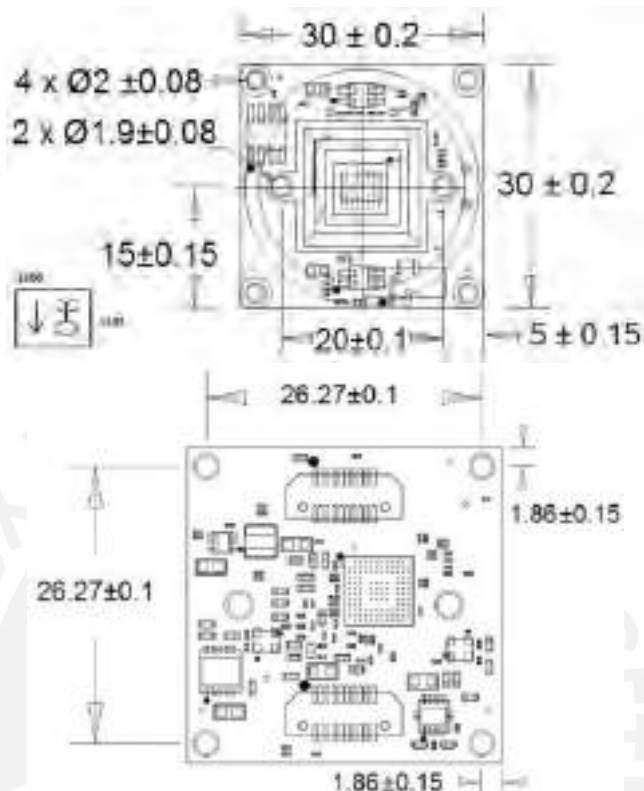


Description	Specification
Size (L x W x H)	65 x 25 x 30 mm (without lens)
Video Format	UYVY, MJPEG and H264
USB	2.0
Image Resolution	640 x 360, HD, FHD, and 1920 x 1072
Supported OS	Windows (both 32-bit and 64-bit) Linux
UVC Compliant	Yes, compliant with UVC version 1.10
Product ID (PID)	0xC123
Vendor ID (VID)	0x2580

Sensor Specification	
Type / Optical Size	1/2.8" optical format CMOS image sensor
Resolution	2.13 MP
Sensor Type	Raw 10/12 bit
Pixel Size	2.9 μm x 2.9 μm
Number of Effective Pixels	1945H x 1097V

D.4. Cámara principal – central

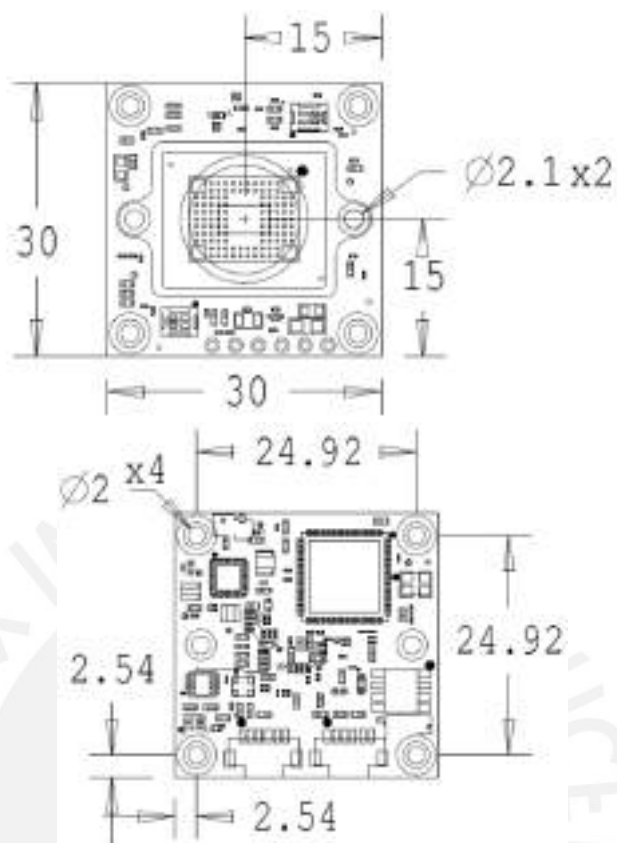
D.4.1 See3CAM_CU30



Description	Specification	
Size (L x W x H)	30 x 30 x 30.2 mm (without lens)	
Video Format	UYVY and MJPEG	
USB	3.0 and 2.0	
Image Resolution	2304 x 1536 (3.4 MP)	
	2048 x 1536	
	2304 x 1296 (3 MP)	
	1920 x 1280	
	1920 x 1080 (FHD)	
	1280 x 960	
	1280 x 720 (HD)	
Supported OS	Windows 8.1, Windows 10 and Linux	
	UVC Compliant	Yes, compliant with UVC Version 1.0
	Product ID (PID)	0xC130
	Vendor ID (VID)	0x2560

Sensor Specification	
Type/Optical Size	1/3" Optical format CMOS image sensor
Resolution	3.4 MP
Sensor Type	10-bit RAW format
Pixel Size	2.2 μm x 2.2 μm
Sensor Active Area	2304H x 1536V
Responsivity	2 V/lux-sec
Signal to Noise Ratio (SNR)	39 dB
Dynamic Range	69.5 dB

D.4.2 e-CAM82_USB



Description	Specification
Size (L x W x H)	30 mm x 30 mm x 25 mm (without lens)
Video Format	YUV and MJPEG
USB	USB 2.0
Image Resolution	VGA (640 x 480)
	HD (1280 x 720)
	1600 x 1200
	FHD (1920 x 1080)
	2048 x 1536
Supported OS	2592 x 1944
	4K UHD (3840 x 2160)
	Windows 8.1 or 10
UVC Compliant	Ubuntu 14.04, 16.04, or 18.04
Product ID (PID)	Yes, compliant with UVC version 1.0
Vendor ID (VID)	0xC181
	0x2560

Sensor Specification	
Type/Optical Size	1/2.8" Optical format CMOS image sensor
Resolution	8 MP
Sensor Type	Color - YUV and MJPEG - CMOS Rolling Shutter sensor
Pixel Size	1.45 μm x 1.45 μm
Sensor Active Pixels	3864H x 2176V

D.4.3 CMT-8MP

Specification:	
Model No	CMT-8MP-IMX415-FY0081
Sensor	1/2.8" SONY IMX415 CMOS
Pixel	8 Mega Pixel
Most effective pixels	3840(H) x 2160(V)
Pixel Size	1.45µm x 1.45µm
Focus type	Auto Focus
Compression format	MJPEG / YUV2 (YUYV)
Resolution & Frame rate	See above
Shutter Type	Electronic rolling shutter
Focus type	Fixed focus
Chroma	Color RGB
Focus	Adjustable from 0-1023
Microphones	Built-in
Interface type	USB2.0
Adjustable parameter	Brightness/Contrast/Color saturation/Hue/Definition/Gamma/White balance/Exposure
Lens FOV	88 degree
Audio frequency	Optional
Power supply	USB BUS POWER
Operating Voltage	DC 5V
Operating Current	300mA
Main chip	DSP/SENSOR/FLASH
Auto Exposure Control (AEC)	Support
Auto White Balance (AEB)	Support
Auto Gain Control (AGC)	Support
Dimension	38MMx38MM
Storage temperature	-20°C to 70°C
Operating temperature	0°C to 60°C
USB cable length	Default
Support OS	WinXP/Vista/Win7/Win8/Win10 Linux with UVC (above linux-2.6.26) MAC-OS X 10.4.8 or later Android 4.0 or above with UVC

D.5. Luces submarinas

D.5.1 OTL-UWL-401



- EQUIVALENT TO 150 WATT HALOGEN
- CAN OPERATE IN WATER OR AIR
- 24 VDC, 20 WATTS



**CAUTION: EXTREMELY BRIGHT
DO NOT LOOK DIRECTLY INTO LIGHT!**

APPLICATIONS INCLUDE: UNDERWATER CAMERA OR WORK LIGHTS

MECHANICAL:

Diameter..... 1.62 in. (41 mm)
 Length (excluding connector)..... 4 in. (102 mm)
 Weight in air..... 7.7 oz. (0.22 kg)
 Weight in seawater..... 2.8 oz. (0.08 kg)
 Depth Rating..... 6560 ft. (2000 m)
 Housing Material..... Anodized Aluminum
 Port Material..... Acrylic

ELECTRICAL:

Input Voltage..... 24 VDC
 Power..... 20 Watts

LIGHT PROPERTIES:

Light Output..... 960 lux @ 1 m
 (2150 lumens; Equiv. to 150 Watt Halogen)
 Color Temperature..... 3000 K
 Beam Angle..... 100 degrees

CONNECTOR:

Standard Connector..... XSG-3-BCL
 Mate for Standard Connector..... RMG-3-F3

1. Power (+)
2. Ground / Common
3. 0-24 VDC Control



D.5.2 OTL-UWL-400



LED Light

OTL-UWL-400

Light, Model OTL- UWL-400

Mechanical

Depth Rating 2000 ft. (800 m)

Housing Anodized Aluminum

Port Acrylic

Connector XSG-3-BCL

Mating Connector RMG-3-FS (sold separately)

Length 4.60 in. (115 mm)

Diameter 2.5 in. (65 mm)

Weight 18 oz. (.5 kg)

Electrical

Voltage 24 VDC

Wattage 35 Watts (equivalent to 250 Watts halogen)

Beam Angle 110 degrees

Output 1030 lux at 1 mt (typically 1740 lumens)

D.5.3 DARK SABER

Dark Saber

SS182mkII

11,000 Lumens LED Light
Adjustable Line Laser 5-100mW
High Intensity Strobe

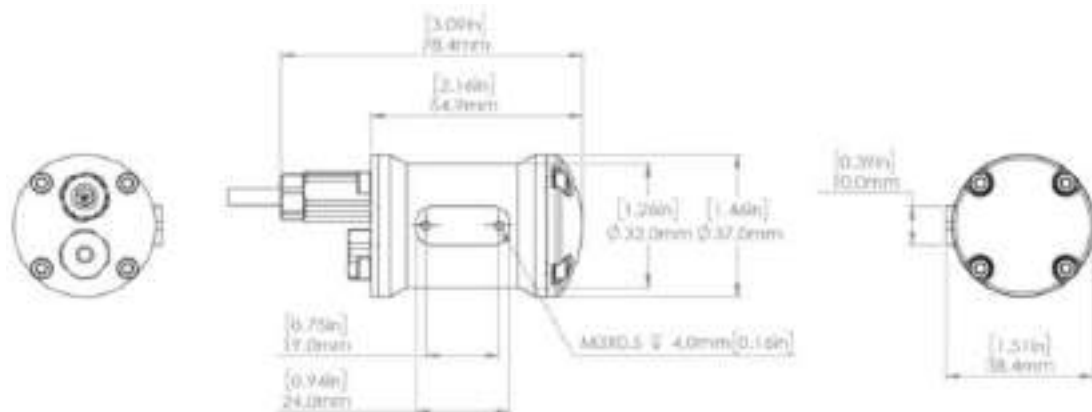


Features

182mkII

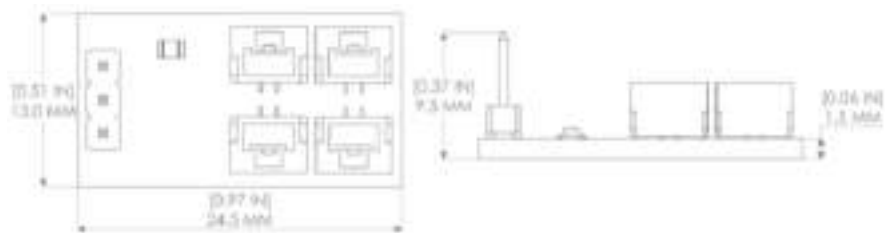
Optical Specifications			
Light Type	High brightness white LED		
Light Intensity (Lumens)	11,000		
Color Temperature	4000 Kelvin		
Color Rendering Index (CRI)	70		
Efficacy	182 Lumens per watt @ 10% intensity	127 Lumens per watt @ Full Intensity	
Beam Angle	≥ 75°		
Laser	520nm direct green	5-100 milliwatts max (adjustable)	Line lens available
Environmental Specifications			
Operating Depth	4000 meters (13,000 ft)		
Operating Temperature	-20° to 60°C (-4°F to +140°F)		
Storage Temperature	-30° to 75°C (-22°F to +167°F)		
Housing	6061 Aluminum, Hard black anodized		
Window	Sapphire (Acrylic optional)		
Electrical Specifications			
Input Voltage	20-36 VDC		
LED Life	50,000 hours minimum		
Thermal Protection	Automatic, 60° C in air		
Power	90w max		
LED Drive	DC Constant current	No flicker	No acoustic noise
Analog Control	0 Volts up to 40 VDC (configurable)		
Digital Control	Serial Ports	Digital Inputs	
	Analog Input	Power Cycling	
Communication Protocol	RS485	RS232	
Strobe Light Output	0 to 14000 Lumens	1 to 100 mS	
	Trigger	Rising or Falling Edge	
	Delay of Trigger	1 mS	
	Rise Time, of to full brightness	70µS	

D.5.4 Lumen subsea light



Parameter	Value
Electrical	
Supply Voltage (V in.)	7-48 volts
Full Brightness Supply Voltage (V in.)	10-48 volts
PWM Logic Voltage	3-40 volts
Peak Current (per light)	15 / V in. amps
Light	
Maximum Brightness	1,500 lumens
Color Temperature	6,200 kelvin
Beam Angle	135 degrees in water
Cable	
Cable Used	UAB-A-3-22AWG
Cable Length (between lights)	1 m 39 in
Cable Length (between cable end penetrator and first light)	0.70 m 27.5 in
Conductor Gauge	22 AWG
Wires	Black - Ground Red - Power Yellow - Signal

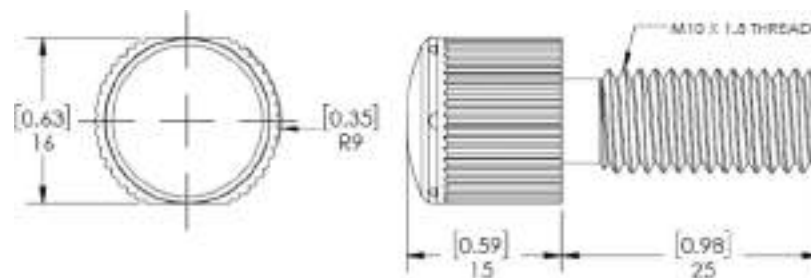
D.6. Sensor de ingreso de agua



Parameter	Value
Operating Voltage	3.3 - 5 V
Maximum Current Draw	20 mA
Output Connector	3 pin 0.1" header
Input Connector	4 x 2 pin JST-GH

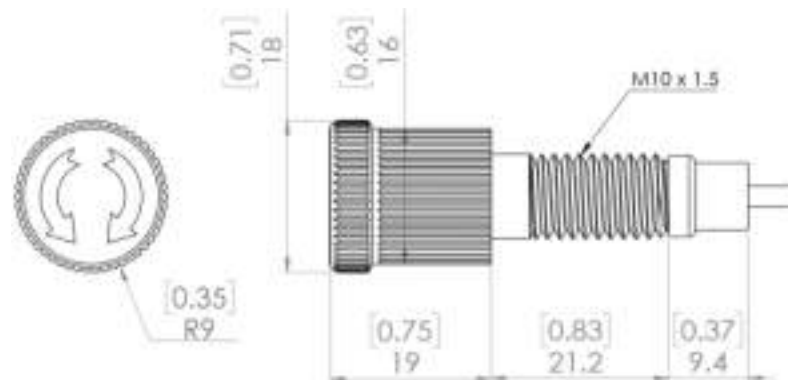


D.7. Indicador submarino



Parameter	Value	
Electrical		
Supply Voltage (Vin)	3 - 18 volts (DC) RED Indicator: 3-30 volts (DC)	
Maximum Current	30 mA	
Cables and Connectors		
Cable Length	180mm	7in
Connectors	Single 0.1" Male Header Pins	
Wires	Black - Ground White/Red/Green/Blue - Power	
Physical		
Mounting Hole Diameter	10mm	0.40in
Tested Depth	300 m	984 ft

D.8. *Switch* submarino



Parameter	Value	
Electrical		
Maximum Operating Voltage	120V AC	26V DC
Operating Current	Up to 5A	
Wire Size	22 AWG	
To Turn ON	Clockwise / Red	
To Turn OFF	Counter-clockwise / Gray	
Input Connector	0.1" Male Header Pin	
Output Connector	TE Connectivity AMP Connector	
Physical		
Maximum Depth (Saltwater)	1,000 m	3,280 ft
Maximum Pressure	9,810 kPa	1,430 psi
Recommended Thru Hole Size	10 - 11 mm	0.4 in
Maximum Wall Thickness	13 mm	0.5 in
Wrench Flats	16 mm	5/8 in
Bolt O - Ring	AS568-013, Buna-N	
Plug O - Rings	2mm Wide, 6mm ID, Buna-N	

D.9. Computador – Jetson Nano




DEVELOPER KIT

GPU	128-core Maxwell
CPU	Quad-core ARM A57 @ 1.43 GHz
Memory	4 GB 64-bit LPDDR4 25.6 GB/s
Storage	microSD (not included)
Video Encoder	4K @ 30 4x 1080p @ 30 9x 720p @ 30 (H.264/H.265)
Video Decoder	4K @ 60 2x 4K @ 30 8x 1080p @ 30 18x 720p @ 30 (H.264/H.265)
Camera	1x MIPI CSI-2 DPHY lanes
Connectivity	Gigabit Ethernet, M.2 Key E
Display	HDMI 2.0 and eDP 1.4
USB	4x USB 3.0, USB 2.0 Micro-B
Others	GPIO, I ² C, I ² S, SPI, UART
Mechanical	100 mm x 80 mm x 29 mm

*Please refer to NVIDIA documentation for what is currently supported.

D.10. Microcontrolador

D.10.1 Blue Pill – STM32F103C8



STM32F103x8

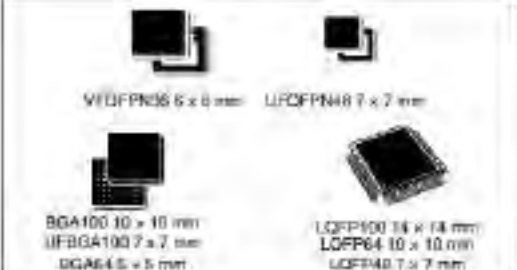
STM32F103xB

Medium-density performance line ARM[®]-based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 com. interfaces

Datasheet - production data

Features

- ARM[®] 32-bit Cortex[®]-M3 CPU Core
 - 72 MHz maximum frequency, 1.25 DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1) performance at 0 wait state memory access
 - Single-cycle multiplication and hardware division
- Memories
 - 64 or 128 Kbytes of Flash memory
 - 20 Kbytes of SRAM
- Clock, reset and supply management
 - 2.0 to 3.6 V application supply and I/Os
 - POR, PDR, and programmable voltage detector (PVD)
 - 4-to-16 MHz crystal oscillator
 - Internal 8 MHz factory-trimmed RC
 - Internal 40 kHz RC
 - PLL for CPU clock
 - 32 kHz oscillator for RTC with calibration
- Low-power
 - Sleep, Stop and Standby modes
 - V_{BAT} supply for RTC and backup registers
- 2 x 12-bit, 1 μ s A/D converters (up to 16 channels)
 - Conversion range: 0 to 3.6 V
 - Dual-sample and hold capability
 - Temperature sensor
- DMA
 - 7-channel DMA controller
 - Peripherals supported: timers, ADC, SPIs, I²Cs and USARTs
- Up to 80 fast I/O ports
 - 26/37/51/80 I/Os, all mappable on 16 external interrupt vectors and almost all 5 V-tolerant



- Debug mode
 - Serial wire debug (SWD) & JTAG interfaces
- 7 timers
 - Three 16-bit timers, each with up to 4 IC/OC/PWM or pulse counter and quadrature (incremental) encoder input
 - 16-bit, motor control PWM timer with dead-time generation and emergency stop
 - 2 watchdog timers (Independent and Window)
 - SysTick timer 24-bit downcounter
- Up to 9 communication interfaces
 - Up to 2 x I²C interfaces (SMBus/PMBus)
 - Up to 3 USARTs (ISO 7816 interface, LIN, IrDA capability, modem control)
 - Up to 2 SPIs (18 Mbit/s)
 - CAN interface (2.0B Active)
 - USB 2.0 full-speed interface
- CRC calculation unit, 96-bit unique ID
- Packages are ECOPACK[®]

Table 1. Device summary

Reference	Part number
STM32F103x8	STM32F103C8, STM32F103R8, STM32F103V8, STM32F103T8
STM32F103xB	STM32F103RB, STM32F103VB, STM32F103CB, STM32F103TB

D.10.2 TM4C123GH6PM

Table 24-1. Absolute Maximum Ratings

Parameter	Parameter Name ^a	Value		Unit
		Min	Max	
V _{DD}	V _{DD} supply voltage	0	4	V
V _{DDA}	V _{DDA} supply voltage ^b	0	4	V
V _{BAT}	V _{BAT} battery supply voltage	0	4	V
V _{BATRMP}	V _{BAT} battery supply voltage ramp time	0	0.7	V/ μ s
V _{IN_GPIO}	Input voltage on GPIOs, regardless of whether the microcontroller is powered ^{ccc}	-0.3	5.5	V
	Input voltage for PD4, PD5, PB0 and PB1 when configured as GPIO	-0.3	V _{DD} + 0.3	V
I _{GPIO MAX}	Maximum current per output pin	-	25	mA
T _S	Unpowered storage temperature range	-65	150	°C
T _{J MAX}	Maximum junction temperature	-	150	°C

Table 24-29. GPIO Module Characteristics^a

Parameter	Parameter Name	Min	Nom	Max	Unit
C _{GPIO}	GPIO Digital Input Capacitance	-	8	-	pF
R _{GPIOPU}	GPIO internal pull-up resistor	13	20	30	k Ω
R _{GPIOPD}	GPIO internal pull-down resistor	13	20	35	k Ω
I _{LKG+}	GPIO input leakage current, 0 V \leq V _{IN} \leq V _{DD} GPIO pins ^b	-	-	1.0	μ A
	GPIO input leakage current, 0 V < V _{IN} \leq V _{DD} , GPIO pins configured as ADC or analog comparator inputs	-	-	2.0	μ A
T _{GPIO R}	GPIO rise time, 2-mA drive ^c	-	14.2	16.1	ns
	GPIO rise time, 4-mA drive ^c	-	11.9	15.5	ns
	GPIO rise time, 8-mA drive ^c	-	8.1	11.2	ns
	GPIO rise time, 8-mA drive with slew rate control ^c	-	9.5	11.8	ns
T _{GPIO F}	GPIO fall time, 2-mA drive ^d	-	25.2	29.4	ns
	GPIO fall time, 4-mA drive ^d	-	13.3	16.8	ns
	GPIO fall time, 8-mA drive ^d	-	8.6	11.2	ns
	GPIO fall time, 8-mA drive with slew rate control ^d	-	11.3	12.9	ns

a. V_{DD} must be within the range specified in Table 24-5 on page 1360.

b. The leakage current is measured with V_{IN} applied to the corresponding pin(s). The leakage of digital port pins is measured individually. The port pin is configured as an input and the pull-up/pull-down resistor is disabled.

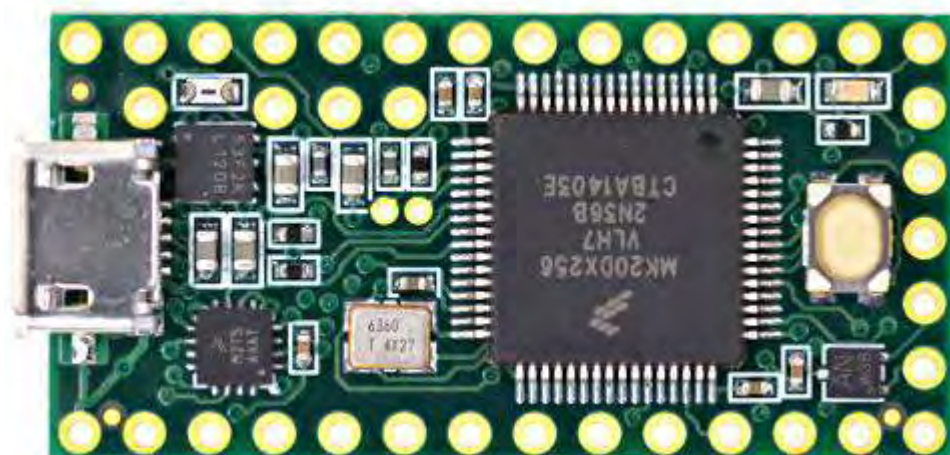
c. Time measured from 20% to 80% of V_{DD}.

d. Time measured from 80% to 20% of V_{DD}.

Note: All GPIO signals are 5-V tolerant when configured as inputs except for PD4, PD5, PB0 and PB1, which are limited to 3.6 V. See "Signal Description" on page 649 for more information on GPIO configuration.

Note: GPIO pads are tolerant to 5-V digital inputs without creating reliability issues, as long as the supply voltage, V_{DD}, is present. There are limitations to how long a 5-V input can be present on any given I/O pad if V_{DD} is not present. Not meeting these conditions will affect reliability of the device and affect the GPIO characteristics specifications.

D.10.3 Teensy 3.2



Teensy 3.2 Technical Specifications

Microcontroller	MK20DX256
Operating voltage	3.3V
Recommended input voltage for V_{CC} pin	3.6V to 5.0V
Analog inputs	21
Digital I/O pins	34
DC source/sink from I/O pins	10mA
Flash memory	256KB
SRAM	64KB
EEPROM	2KB
Frequency (clock speed)	72MHz
Communication	I ² C, SPI, UART, CAN, USB

D.11. Pantalla para visualización

D.11.1 ILI9341



Fabricante	HiLetgo
Brand	HiLetgo
Peso del producto	1.13 onzas
Dimensiones del paquete	3.82 x 2.32 x 0.71 pulgadas
Número de modelo del producto	3-01-0191-AU-1PC
Is Discontinued By Manufacturer	No
Color	Rojo
Número de productos	1
Tamaño	S
Número de pieza del fabricante	3-01-0191

D.11.2 ST7735R



Specifications:

- 1.8" diagonal LCD TFT display
- 128x160 resolution, 18-bit (262,144) color
- 4 or 5 wire SPI digital interface
- Built-in microSD slot - uses 2 more digital lines
- 5V compatible! Use with 3.3V or 5V logic
- Onboard 3.3V @ 150mA LDO regulator
- 2 white LED backlight, transistor connected so you can PWM dim the backlight
- 1x10 header for easy breadboarding
- 4 x 0.9"/2mm mounting holes in corners
- Overall dimensions: 1.35" x 2.2" x 0.25" (34mm x 56mm x 6.5mm)
- Current draw is based on LED backlight usage: with full backlight draw is ~50mA



D.11.3 Raspberry Pi Zero W Screen



Resolution: 480x320
Size: 3.5 inch
Refresh Rate: ≥ 60 fps
Connection Type: GPIO
High Speed: Support
Touch Function: Support



D.12. Regulador de voltaje

D.12.1 XL4015



Especificaciones:

Tipo: Módulo DC-DC Módulo Step-down

entrada de voltaje: 4 – 38 V

Voltaje de salida: 1.25 V a 36 V (continuamente ajustable)

Corriente de Salida: 0 a 5 A

Potencia de salida: 75 W

Temperatura de funcionamiento: -40 – + 85 °C

Frecuencia: 180 kHz

Eficiencia: 96% (máxima)

Regulación de la carga: $S(l) \leq 0,8\%$ (carga entrada de 24 V, Salida de 12 V, medido desde $V - a$ diferencial)

Regulación de voltaje: $S(u) \leq 0,8\%$ (salida de 12 V, 4 A, Voltaje medido desde 18 – 52 V, Variación)

Protección contra cortocircuitos: Sí (límite de corriente 8 A)

Sobre la protección de la temperatura: sí (apagado automáticamente)

Método de montaje: 2 tornillos de 3 mm.

Método de cableado: Soldadura

Tamaño: 54 x 23 y/2.12 x 0.9 x 0.59"

Cantidad: 10

El paquete incluye:

10 x Módulo Step-down de voltaje

MCMXVII

D.12.2 XL4016



Parámetros: Propiedades del módulo: módulo reductor no aislado, módulo de corriente constante y voltaje constante (CC CV)

Voltaje de entrada: DC 7-32 V

Voltaje de salida: CC 0,8-28 V (ajustable continuamente)

Corriente de salida: 12A máx. (añade un ventilador de refrigeración si la temperatura del tubo de alimentación supera los 65°C)

Rango de corriente constante: 0,2-12 A (continuosely ajustable)

Voltaje de caída: 1 V potencia de salida: potencia máxima de aproximadamente 300 W

Eficiencia de conversión: hasta aproximadamente 95%

Ondulación de salida: aproximadamente 50 mV cuando se introduce 24 V de salida 12 V 6A

Temperatura de funcionamiento: Grado Industrial (-40 °C a + 85 °C)

Corriente sin carga: regulación de carga de 20 mA típica: 1% (voltaje constante)

Regulación del voltaje: $\pm 1\%$ velocidad de respuesta dinámica: 5% 200 μ S ajuste del potenciómetro: en sentido horario (aumento), en sentido contrario a las agujas del reloj (reducción). El potenciómetro cercano al puerto de entrada es para ajustar el voltaje (CV), el potenciómetro cerca del puerto de salida es para ajustar la corriente (CC).

Protección de polaridad inversa de entrada: No

Salida evitar el retroceso: No

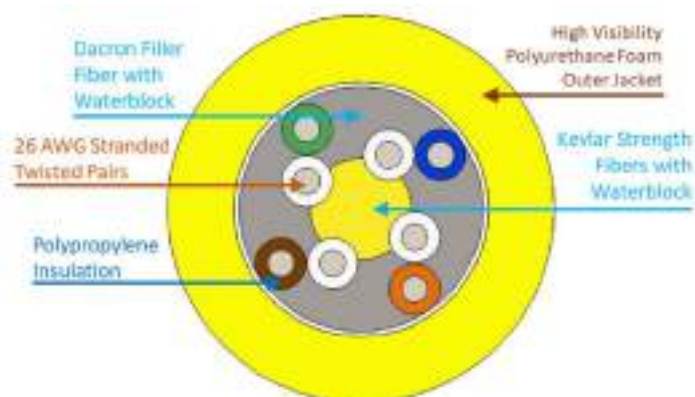
Tamaño: aproximadamente 65*47*23,5mm

D.12.3 UBEC 5V power supply



Parameter	Value	
Electrical		
Supply Voltage	7-26V	2S-6S Li-po/Li-Ion Battery
Output Voltage	5 Volts DC	
Output Current (Max)	6 Amps (combined output)	
Input Connector	Non-Insulated Spades	
Output Connectors	3 position 0.1" (2.54mm) Crimp Connector Housing	
Physical		
Length	37 mm	1.45 in
Width	18 mm	0.71 in
Height	6 mm	0.24 in
Input Wire Length	140 mm	5.5 in
Output Wire Length	115 mm	4.5 in

D.13. Fathom ROV Tether



Parameter	Value	
Physical		
Tether Diameter	7.6 mm	0.30 in
Weight	0.043 kg/m	0.0287 lb/ft
Outer Jacket	Polyurethane Foam	
Buoyancy in Freshwater	Neutral	
Buoyancy in Saltwater	Slightly Positive	
Wire Gauge	0.14 mm ²	26 AWG
Working Strength	35 kg _f	80 lb
Breaking Strength	155 kg _f	350 lb
Minimum Working Bend Diameter	75 mm	3 in
Electrical		
DC Resistance @ 20°C	0.0386 Ω/ft	0.127 Ω/m
Insulation Resistance @ 500 VDC	> 500 MΩ/kft	> 1640 MΩ/km
Voltage Rating	300 VDC	

D.14. Módulo relé 1 canal 5V



Specification

- The supply voltage VCC: 5 V
- It is enabled by the high state: min 3.3 V
- Relay SRD-05VDC-SL-C ([documentation](#))
 - Coil voltage: 5 V
 - The maximum voltage of contacts: 250 VAC at 10 A / 125 VAC at 10 A
 - Maximum current: 10 A
- Tile sizes 34 x 26 mm














D.15. Celda LGMH1 de la batería 12.6V 3S







Item	Condition / Note	Specification
Energy (Power)	Std. charge / discharge	Nominal 3200 mAh Minimum 3100 mAh
Nominal Voltage	Average	3.67V
Standard Charge	Constant current	0.5C (1550mA)
	Constant voltage	4.2V
	End current(Cut off)	50mA
Max. Charge Voltage		4.2 ± 0.05V
Max. Charge Current		1.0 C (3100mA)
Standard Discharge	Constant current	0.2C (620mA)
	End voltage(Cut off)	2.5V
Max. Discharge Current		10A
Weight		Max. 49.0 g
Operating Temperature	Charge	0 ~ 45°C
	Discharge	-20 ~ 60°C
Storage Temperature	1 month	-20 ~ 60°C
	3 month	-20 ~ 45°C
	1 year	-20 ~ 20°C

ANEXO E: Cotizaciones

E.1. Compras BlueRobotics

Product	Price	Quantity	Subtotal
 Waterlight Enclosure (2" Locking Series)	\$126.00	<input type="text" value="2"/>	\$252.00
Tube: Waterlight Enclosure Tube (2" Locking Series) Inner Diameter: 50 mm (2") Material - Length - Depth Rating: Aluminum - 100 mm (3.9") - 950m	\$42.00	2	Subtotal: \$84.00
End Cap #1 Options: Waterlight Enclosure End Caps and Flange Caps (2" Locking Series) Inner Diameter: 50 mm (2") Type - Material - Features - Depth Rating: Dome - Optically Clear Acrylic - 950m	\$19.00	2	Subtotal: \$38.00
O-Ring Sealing Flange #1: O-Ring Flanges (2" Locking Series) (50mm (2"))	\$27.00	2	Subtotal: \$54.00
End Cap #2 Options: Waterlight Enclosure End Caps and Flange Caps (2" Locking Series) Inner Diameter: 50 mm (2") Type - Material - Features - Depth Rating: Flange Cap - Aluminum - 2 Holes - 950m	\$29.00	2	Subtotal: \$58.00
Vent: Enclosure Vent and Plug	\$9.00	2	Subtotal: \$18.00
 Low-Jitter HD USB Camera	\$99.00	<input type="text" value="2"/>	\$198.00
 SOS Link Server	\$29.00	<input type="text" value="1"/>	\$29.00
 SOS Probe - 6" Single Tap Probe	\$2.00	<input type="text" value="1"/>	\$2.00
 SOS Probe Ties	\$5.00	<input type="text" value="1"/>	\$5.00
 BNC to High Resolution Video Depth/Pressure Sensor	\$72.00	<input type="text" value="1"/>	\$72.00
 M10 Cable Penetrance for 6-Fmm Cable	\$4.00	<input type="text" value="1"/>	\$4.00
 Pressure Wireoff	\$13.00	<input type="text" value="1"/>	\$13.00
 Potentiometer 100	\$10.00	<input type="text" value="1"/>	\$10.00
 M10 Cable Penetrance for 6mm Cable	\$5.00	<input type="text" value="1"/>	\$5.00
 Lenses Standard HD 15x Diameter 6mm 1.4	\$400.00	<input type="text" value="1"/>	\$400.00
 Golfview LED Indicator - Blue	\$13.00	<input type="text" value="1"/>	\$13.00
 Subsea LED Indicator - Green	\$13.00	<input type="text" value="1"/>	\$13.00

  Subeas LED Indicator - Red	\$13.00	<input type="text" value="1"/>	\$13.00
  Switch	\$15.00	<input type="text" value="1"/>	\$15.00

Cart totals

Subtotal	\$1,044.00
Shipping	DHL Express: \$65.40 Shipping to Lima, Lima, 15084, Peru. Change address
Tax	Taxes will be calculated at checkout
Total	\$1,109.40

[Proceed To Order / Quote](#)



PUCP
DIRECCION DE ADMINISTRACION Y FINANZAS
OFICINA DE LOGÍSTICA

COSTEO PREVIO DE IMPORTACIÓN

PROVEEDOR: BLUE ROBOTICS

ITEM	PRECIO
Quote Online	\$1,109.40
TOTAL	\$ 1,109.40
























Id Sol.:
VIA: Aérea
Peso (kg):
Volumen (m³):
ORIGEN:

DERECHOS	
Ad-Valorem	\$0.00
IGV	\$199.69
Tasa Aduanera	\$0.00
Otros Derechos	\$0.00
Total Derechos	\$ 199.69

GASTOS	
Handling	\$35.00
Almacenaje	\$65.00
Transporte	\$10.00
Otros gastos logísticos	\$60.00
Formulario M.E.	\$0.00
Imprevistos **	\$0.00
Sub total Gastos Operativos	\$165.00
Agente Aduana (courier)	\$25.00
Total Gastos	\$190.00

* Valor Total de Importación

\$ 1,499.09

	Product	Price	Quantity	Subtotal
	 Switch	\$15.00	<input type="text" value="3"/>	\$45.00
	 White 3" Enclosure for ROW/AVN (3" Series)	\$218.00	<input type="text" value="1"/>	\$218.00
	Tube: Aluminum Tube - 8.75" 222mm (3" Series)	— \$120.00	1	— Subtotal: \$120.00
	O-Ring Flange: O-Ring Flange (3" Series)	— \$24.00	<input type="text" value="2"/>	— Subtotal: \$48.00
	End Cap 1: Dome End Cap (3" Series)	— \$29.00	1	— Subtotal: \$29.00
	End Cap 2: Aluminum End Cap with 4 Holes (3" Series)	— \$12.00	1	— Subtotal: \$12.00
	Vent: Enclosure Vent and Plug	— \$9.00	1	— Subtotal: \$9.00
	White 3" Enclosure End Caps and Flange Caps (1-Ready Draw)			
	 Inner Diameter: 50 mm (2") Type - Material - Features - Depth Rating: Flange Cap - Aluminum - 4 Holes - 950m	\$31.00	<input type="text" value="2"/>	\$62.00
	 M10 Cable Enclosure for 8mm Cable	\$5.00	<input type="text" value="8"/>	\$40.00
	 Yellow ROV Tether (by the meter) Required Length (m): 2	\$10.00	<input type="text" value="4"/>	\$40.00
	 White 4" Enclosure for ROW/AVN (4" Series)	\$287.00	<input type="text" value="1"/>	\$287.00
	Tube: Aluminum Tube - 11.75" 298mm (4" Series)	— \$180.00	1	— Subtotal: \$180.00
	O-Ring Flange: O-Ring Flange (4" Series)	— \$29.00	<input type="text" value="2"/>	— Subtotal: \$58.00
	End Cap 1: Clear Acrylic End Cap (4" Series)	— \$16.00	1	— Subtotal: \$16.00
	End Cap 2: Aluminum End Cap with 10 Holes (4" Series)	— \$24.00	1	— Subtotal: \$24.00
	Vent: Enclosure Vent and Plug	— \$9.00	1	— Subtotal: \$9.00
	 M10 Cable Enclosure Blank (16x4x6)	\$4.00	<input type="text" value="8"/>	\$32.00

Product	Price	Quantity	Subtotal
 Ultrasonic Motor with Propeller	\$2.00	3	\$6.00
 Myrcat and Original Version Battery	\$88.00	1	\$88.00
 Propeller Design - 10y Tube	\$3.00	5	\$15.00

Coupon code:

Cart totals

Subtotal	\$939.00
Shipping	DHL Express: \$92.56 Shipping to Lima, Lima, LIMA32, Peru Change location
Tax	Taxes will be calculated at checkout
Total	\$925.56



PUCP
DIRECCION DE ADMINISTRACION Y FINANZAS
OFICINA DE LOGISTICA

COSTEO PREVIO DE IMPORTACIÓN

PROVEEDOR: BLUE ROBOTICS

ITEM	PRECIO
Quote Online:	\$925.56
TOTAL	\$ 925.56

Id Sol:
VIA: Aérea
Peso (kg):
Volumen (m³):
ORIGEN:

DERECHOS	
Ad-valorem	\$0.00
IGV	\$166.60
Tasa Aduanera	\$0.00
Otros Derechos	\$0.00
Total Derechos	\$ 166.60

GASTOS	
Handling	\$35.00
Almacenaje	\$65.00
Transporte	\$0.00
Otros gastos logísticos	\$50.00
Formulario M.E.	\$0.00
Imprevistos **	\$0.00
Sub total Gastos Operativos	\$150.00
Agente Aduana (courier)	\$25.00
Total Gastos	\$175.00

* Valor Total de Importación

\$ 1,267.16

E.2. Perfiles, conectores, tuercas y tornillos



Importador, Distribuidor por mayor y minorista de Arduino compatible, Módulos Electrónicos, Kits de entrenamiento, Robots, Raspberry, Accesorios, Módulos de Audio, Impresoras 3D, PLA, ABS, Pines y Placas de CNC

Lima: 194728-423
 Píscina: 026 613 416
 www.saisac.pe

R.U.C. 20602047572

FACTURA

0001- **Nº 009178**

Señor(es): PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
 Dirección: AV. UNIVERSITARIA N.º. 1801 URB. PANDO LIMA - LIMA - SAN MIGUEL
 R.U.C.: 20155945860 Guía N° Lima 17 de 09 del 2021

CANT.	DESCRIPCION	P.UNITARIO	IMPORTE
01	PERFIL V-SLOT DE 3.2M DE 20 X 20MM	90.00	90.00
16	CONECTOR ESQUINA 90° V-SLOT 20 X 20	2.50	40.00
64	TORNILLO DE BAJA PERFIL M5 X 8	0.20	12.80
48	TORNILLO DE BAJA PERFIL M5 X 13	0.25	12.00
64	TUERCA ENT. DREA TORNILLO M5	0.80	51.20
03	HACHO M5	2.00	6.00
01	CORTE X 16	32.00	32.00

SON: DOS CIENTOS CUARENTA Y CUATRO 7 00/100 SOLAS



CANCELADO

Lima 17 de 09 del 2021


FIRMA

SUB-TOTAL 206.78

IGV 18% 37.22

TOTAL 244.00

ADQUIRENTE O USUARIO



Importador, Distribuidor por mayor y minorista de Arduino compatible, Módulos Electrónicos, Kits de entrenamiento, Robots, Raspberry, Accesorios, Módulos de Audio, Impresoras 3D, PLA, ABS, Pines y Placas de CNC

Lima: 194728-423
 Píscina: 026 613 416
 www.saisac.pe

R.U.C. 20602047572


FACTURA

0001- **Nº 003688**

Señor(es): PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
 Dirección: AV. UNIVERSITARIA 1801 PABO SAN MIGUEL
 R.U.C.: 20155945860 Guía N° Lima 03 de 07 del 2021

CANT.	DESCRIPCION	P.UNITARIO	IMPORTE
00	Kit Perfil tuercas y tornillo 8m	312.00	3120.00

SON: Veinti Cuatro con 00/100 solas



CANCELADO

Lima 03 de 07 del 2021

FIRMA

3120.33

53.67

3174.00

ADQUIRENTE O USUARIO

RAYLAMP MECHATRONICS S.A.C.		FACTURA ELECTRONICA		
MZA. E INT. 1 LOTE 31 URB. INGENIERIA COSTADO DE RESTAURANTE COCOLISO		RUC: 20601252610		
TRUJILLO - TRUJILLO - LA LIBERTAD		E001-2301		
Fecha de Vencimiento: / /				
Fecha de Emisión: 19/04/2021				
Señor(es): PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATORICA DEL PERU				
RUC: 20155945860				
Dirección del Cliente: AV. UNIVERSITARIA 1801 URB. PANDO LIMA-LIMA-SAN MIGUEL				
Tipo de Moneda: SOLES				
Observación:				
Cantidad	Unidad Medida	Descripción	Valor Unitario	ICBPER
1.00	UNIDAD	MODULO CAN MCP215	16,949153	0.00
8.00	UNIDAD	CONECTOR CUBO DE 3 PINES	12,711864	0.00
2.00	UNIDAD	CABLE DUPONT HEMBRA A HEMBRA 30CM / 30UND	4,237988	0.00
2.00	UNIDAD	CABLE DUPONT HEMBRA A HEMBRA 30CM / 30UND	2,340373	0.00
1.00	UNIDAD	LLAVE MANOAL PARA TARRAJA	21,186441	0.00
1.00	UNIDAD	ENVIO	8,474570	0.00
Valor de Venta de Operaciones Gratuitas: S/ 0.00			Sub Total Ventas: S/ 181.85	
			Anticipo: S/ 0.00	
			Descuentos: S/ 0.00	
SON: CIENTO NOVENTA Y UNO Y 00/100 SOLES			Valor Venta: S/ 181.85	
			ISC: S/ 0.00	
			IGV: S/ 29.15	
			ICBPER: S/ 0.00	
			Istres/Cargos: S/ 0.00	
			Otro Tributos: S/ 0.00	
			Monto de retención: S/ 0.00	
			Importe Total: S/ 191.00	
Esta es una representación impresa de la factura electrónica, generada en el Sistema de SUNAT. Puede verificarla utilizando su clave SOL.				

COMERCIAL BELGEE TECHNOLOGY		FACTURA ELECTRONICA		
DELGADO LLANA EUGENIO EMILIANO		RUC: 10406735104		
MZA. PLOYS 24 URB. VIRGEN DE COCHABAMBA		E001-6		
VILLA EL SALVADOR - LIMA - LIMA				
Fecha de Vencimiento: / /				
Fecha de Emisión: 28/07/2021				
Señor(es): PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATORICA DEL PERU				
RUC: 20155945860				
Establecimiento del Emisor: URB. VIRGEN DE COCHABAMBA MZA. P LOYS 24 LIMA-LIMA-VILLA EL SALVADOR				
Tipo de Moneda: SOLES				
Observación:				
Cantidad	Unidad Medida	Descripción	Valor Unitario	ICBPER
1.00	UNIDAD	10 TORNELOS B228	19.00	0.00
1.00	UNIDAD	20 TORNELOS M28 Y FETOR DEL SUPORTE	25.00	0.00
Valor de Venta de Operaciones Gratuitas: S/ 0.00			Sub Total Ventas: S/ 44.00	
			Anticipo: S/ 0.00	
			Descuentos: S/ 0.00	
			Valor Venta: S/ 44.00	
			ISC: S/ 0.00	
			IGV: S/ 8.36	
			ICBPER: S/ 0.00	
			Istres/Cargos: S/ 0.00	
			Otro Tributos: S/ 0.00	
			Monto de retención: S/ 0.00	
SON: VEINTICUATRO Y 00/100 SOLES			Importe Total: S/ 52.36	
Esta es una representación impresa de la factura electrónica, generada en el Sistema de SUNAT. Puede verificarla utilizando su clave SOL.				

MULTI-PERNOS CAPEVA CARRILLO PEREZ DIONICIO VALENTIN AV. GUILLERMO DANSEY 829 C.C. UDAMPE CALLE 11 STAND 899 E100 LIMA - LIMA - LIMA		FACTURA ELECTRONICA RUC: 10105320716 E001-1628																								
Fecha de Venimiento :																										
Fecha de Emisión :	22/07/2021																									
Señor(es) :	PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU																									
RUC :	20155945060																									
Dirección del Cliente :	AV. UNIVERSITARIA 1801 URB. PANDO LIMA-LIMA-SAN MIGUEL																									
Tipo de Moneda :	SOLES																									
Observación :																										
Cantidad	Unidad Medida	Descripción	Valor Unitario	ICBPER																						
24.00	UNIDAD	SBC PAN M3 X 8 COMPLETO INOX	0.3135594	0.00																						
12.00	UNIDAD	SBC PAN M3 X 10 COMPLETO INOX	0.4237289	0.00																						
78.00	UNIDAD	SBC PAN M3 X 14 COMPLETO INOX	0.5084746	0.00																						
15.00	UNIDAD	SBC PAN M3 X 16 COMPLETO INOX	0.4237289	0.00																						
18.00	UNIDAD	SBC PAN M3 X 20 COMPLETO INOX	0.4661017	0.00																						
147.00	UNIDAD	TUERCA HEXA M3 INOX	0.101695	0.00																						
1.00	UNIDAD	MOVILIDAD	12.711865	0.00																						
Valor de Venta de Operaciones Gratuitas : <input type="text" value="S/ 0.00"/>		<table border="1"> <tr> <td>Sub Total Ventas</td> <td style="text-align: right;">S/ 94.88</td> </tr> <tr> <td>Anticipos</td> <td style="text-align: right;">S/ 0.00</td> </tr> <tr> <td>Descuentos</td> <td style="text-align: right;">S/ 0.00</td> </tr> <tr> <td>Valor Venta</td> <td style="text-align: right;">S/ 94.88</td> </tr> <tr> <td>ISC</td> <td style="text-align: right;">S/ 0.00</td> </tr> <tr> <td>IGV</td> <td style="text-align: right;">S/ 17.94</td> </tr> <tr> <td>ICBPER</td> <td style="text-align: right;">S/ 0.00</td> </tr> <tr> <td>Otros Cargos</td> <td style="text-align: right;">S/ 0.00</td> </tr> <tr> <td>Otros Tributos</td> <td style="text-align: right;">S/ 0.00</td> </tr> <tr> <td>Monto de subpago</td> <td style="text-align: right;">S/ 0.00</td> </tr> <tr> <td>Importe Total</td> <td style="text-align: right;">S/ 111.72</td> </tr> </table>			Sub Total Ventas	S/ 94.88	Anticipos	S/ 0.00	Descuentos	S/ 0.00	Valor Venta	S/ 94.88	ISC	S/ 0.00	IGV	S/ 17.94	ICBPER	S/ 0.00	Otros Cargos	S/ 0.00	Otros Tributos	S/ 0.00	Monto de subpago	S/ 0.00	Importe Total	S/ 111.72
Sub Total Ventas	S/ 94.88																									
Anticipos	S/ 0.00																									
Descuentos	S/ 0.00																									
Valor Venta	S/ 94.88																									
ISC	S/ 0.00																									
IGV	S/ 17.94																									
ICBPER	S/ 0.00																									
Otros Cargos	S/ 0.00																									
Otros Tributos	S/ 0.00																									
Monto de subpago	S/ 0.00																									
Importe Total	S/ 111.72																									
SON: CIENTO ONCE Y 72/100 SOLES																										
Esta es una representación impresa de la factura electrónica, generada en el Sistema de SUNAT. Puede verificarlo utilizando su clave SOL.																										



E.3. Filamento para impresión

Digitalz 3D PRINTING IDEAS

Calle Pinar del Sur 478, Ciudad de México | CDMX 06164 | Tel: 55 52 22 11 | WhatsApp: 55 52 22 11

🔍 Buscar en Digitalz 3D

🛒 8 📍

ESCRIBES 3D | ESCÁNER 3D | FILAMENTOS | RESINAS | REPARSOS | CONTACTANOS | PROMOCIONES | BLC

Mi carrito

	Filamento Carbono Negro 1.75mm 1kg Filbox	S/1,000.00	X
<input type="text" value="1"/>			

Iniciar código promocional

Registrar una tienda

Subtotal S/1,000.00

Total **S/1,000.00**

Impuesto incluido



E.4. Componentes electrónicos

- Cámara principal – central

e-CAM02_USB
e-CAM02_USB - Sony STARVIS™ IMX415 4K Ultra-HD USB Camera



Categories: USB 3.0 Camera

Kit content:

1. x1 e-CAM02_USB (4K Ultra-HD USB camera board)
1. USB 3.0 cable - USB-A to type-C
1. Lens cap (OPRM)
1. e-CAM02_USB (IMX415) / (IMX415) main / video processing and photo capture application

Port Number	Quantity	Price/Unit	Credit card/Paypal
e-CAM02_USB_CH1 (IMX415)	1 Unit	US \$120	Buy Now
e-CAM02_USB_CH (IMX415)	250 (100%)		Join us now
	500 (100%)		
	1000 (100%)		

- Computador – Jetson Nano



NVIDIA Jetson Nano Developer Kit (945-13450-0000-100)

SKU: 945-13450-0000-100

Price: US\$129.95 + tax (21%)

Series: 945-13450-0000-100

Model: 94500

Manufacturer: NVIDIA

Location: Singapore

Product ID: 94500

Setting up the kit

- The Jetson Nano Developer Kit is a powerful, compact, and easy-to-use single-board computer (SBC) that is ideal for prototyping and deploying AI applications. It features a powerful NVIDIA Jetson Nano processor, 4GB of RAM, and a variety of ports and connectors. The kit includes everything you need to get started, including the board, a power supply, a USB-C cable, and a microSD card.
- The Jetson Nano Developer Kit is a powerful, compact, and easy-to-use single-board computer (SBC) that is ideal for prototyping and deploying AI applications. It features a powerful NVIDIA Jetson Nano processor, 4GB of RAM, and a variety of ports and connectors. The kit includes everything you need to get started, including the board, a power supply, a USB-C cable, and a microSD card.
- The Jetson Nano Developer Kit is a powerful, compact, and easy-to-use single-board computer (SBC) that is ideal for prototyping and deploying AI applications. It features a powerful NVIDIA Jetson Nano processor, 4GB of RAM, and a variety of ports and connectors. The kit includes everything you need to get started, including the board, a power supply, a USB-C cable, and a microSD card.

USD (78.95)

Set up your kit

Save your kit

Buy Now

Join us now

- Microcontrolador – Blue Pill

TRANSSTORE, ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN EMPRESA INDIVIDUAL DE RESPONSABILIDAD LIMITADA-TRANSSTORE MZA. 3 LOTE 9 URB. PABLO VI ETAPA II AREQUIPA - AREQUIMA - AREQUIPA		FACTURA ELECTRONICA RUC: 20606271868 8001-4		
Fecha de Venta/Emisión: 02/09/2021 Fecha de Emisión: 02/09/2021 Beneficiario: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU RUC: 20155945860 Establecimiento del Emisor: URB. PABLO VI ETAPA II MZA. 3 LOTE 9 AREQUIPA-AREQUIPA-AREQUIPA Tipo de Moneda: SOLES Dirección:				
Cantidad	Unidad Medida	Descripción	Valor Unitario ICBPER	
1.00	UNIDAD	STM32F103RBT6 BUII-PTU	25.00	0.00
1.00	UNIDAD	MUS-VECTO-ETHO-H4CS83L	14.00	0.00
1.00	UNIDAD	MODULO HTU92SU	15.00	0.00
Monto de Venta de Operaciones Ordinarias: S/ 59.00			Sub Total Ventas: S/ 59.00 Anticipos: S/ 0.00 Descuentos: S/ 0.00 Valor Venta: S/ 59.00 IGV: S/ 0.00 IGV: S/ 10.62 JEDPERU: S/ 0.00 Otros Cobros: S/ 0.00 Otros Tributos: S/ 0.00 Monto de cobros: S/ 0.00 Importe Total: S/ 69.62	
SON: SESENTA Y NUEVE Y 62/100 SOLES				
Esto es una representación impresa de la factura electrónica, generada en el Sistema de SUNAT. Fuese verificado utilizando el código SOL.				

- Pantalla de visualización y regulador de voltaje

elegan

ELECTRONICA GONZALES EJ R.L.
 Central: CALLE PARURO 318 - 335 AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA
 RUC: 20468514142

CAJERO: JENNIFER
 Telf: JIRON PARURO 1349 INT 47 - LIMA
 Factura Electronica F001-0000841
 Fecha: 20/09/2021 12:17:28
 Condición: Contado

Razon Social: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
 RUC: 20155945860
 Dirección: AV UNIVERSITARIA 1801 SAN MIGUEL LIMA

Cant	Descripción	Importe
1	TFT 2.2 PANTALLA	70.00

Dg. Oveada: S/ 59.32
 18% IGV: S/ 10.68
 Importe Total: S/ 70.00
 Efectivo: S/ 70.00
 Cambio: S/ 0.00

SON: SETENTA CON 00/100 SOLES

JIREH ELECTRONIC

FACTURA ELECTRONICA
 No. F001-0002178
 JIREH ELECTRONICS SAC
 RUC: 2019038280
 JR. PARURO 1350 INT. 107 LIMA

02/09/21 18:27:41 VENDO ROSA
 N° DE SERIE: 37AU32872
 N° AUTORIZ: 1

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU

AV UNIVERSITARIA 1801 URB. PABLO VI - LIMA - SAN MIGUEL
 RUC: 20155945860
 Tipo Venta: CONTADO

CANT	DESCRIPCION	IMPORTE	IMPORTE
1.00UNID	CABLE DOBLE TIRAS PIN HEMBRA Y MACHO 15CM	4.00	4.00
1.00UNID	CABLE JUMPER HEMBRA-HEMBRA 15CM	4.00	4.00
1.00UNID	CABLE JUMPER MACHO-MACHO 15CM	4.00	4.00
1.00UNID	MODELO DE CABLES DE 4 BITS ROJO	4.00	4.00
1.00UNID	CONECTOR DOBLE 2PINES 20MM ALTA 2.54MM	17.00	17.00
1.00UNID	CONECTOR DOBLE 2PINES 20MM ALTA 2.54MM	19.00	19.00

Valor Venta: S/ 69.00
 IGV: 18% 12.42
 Total Venta: S/ 81.42

SON: CHABARITA Y CINCO CON 00/100 SOLES

- Bateria 12.6V 3S

BOC ELECTRONIC PERU LEON JUAREZ JAVIER ARMANDO AV. NICOLÁS AVILÓN 113 URB. MANGAMILLA FRENTE A PUENTE LIMA - LIMA - PERU		FACTURA ELECTRONICA RUC: 10474053213 F001-107																															
Fecha de Emisión: 05/06/2021 Fecha de Emisión: 05/06/2021 Razon Social: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU RUC: 30155945860 AV. UNIVERSITARIA 1001 URB. PAMOLINO LIMA - LIMA - SAN MIGUEL Tipo de Moneda: SOLES																																	
Cantidad Unidad Medida Descripción Valor Unitario T.C.P.E.R.	<table border="1"> <tr> <td>1.00</td> <td>UNIDAD</td> <td>PACK BATERIA CONFIG 3S2D 12.6V 6.8AH (5 CELDAS 19450 LS-1945) LT-ION RECARGABLE</td> <td>210.00</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>1.00</td> <td>UNIDAD</td> <td>CARGADOR ESPECIFICO 3S 12.6V 7A LT-ION</td> <td>38.00</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>1.00</td> <td>UNIDAD</td> <td>CABLE CONECTOR 3S10-13CM</td> <td>6.770</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>1.00</td> <td>METRO</td> <td>CABLE AUTOMOTRIZ INDECO AWG #16 NEGRO</td> <td>0.78</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>1.00</td> <td>METRO</td> <td>CABLE AUTOMOTRIZ INDECO AWG #16 NEGRO</td> <td>1.18</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>1.00</td> <td>UNIDAD</td> <td>SERVICIO DE ENVIO DELIVERY CERCADO-JESUS MARIA</td> <td>15.000</td> <td>0.00</td> </tr> </table>			1.00	UNIDAD	PACK BATERIA CONFIG 3S2D 12.6V 6.8AH (5 CELDAS 19450 LS-1945) LT-ION RECARGABLE	210.00	0.00	1.00	UNIDAD	CARGADOR ESPECIFICO 3S 12.6V 7A LT-ION	38.00	0.00	1.00	UNIDAD	CABLE CONECTOR 3S10-13CM	6.770	0.00	1.00	METRO	CABLE AUTOMOTRIZ INDECO AWG #16 NEGRO	0.78	0.00	1.00	METRO	CABLE AUTOMOTRIZ INDECO AWG #16 NEGRO	1.18	0.00	1.00	UNIDAD	SERVICIO DE ENVIO DELIVERY CERCADO-JESUS MARIA	15.000	0.00
1.00	UNIDAD	PACK BATERIA CONFIG 3S2D 12.6V 6.8AH (5 CELDAS 19450 LS-1945) LT-ION RECARGABLE	210.00	0.00																													
1.00	UNIDAD	CARGADOR ESPECIFICO 3S 12.6V 7A LT-ION	38.00	0.00																													
1.00	UNIDAD	CABLE CONECTOR 3S10-13CM	6.770	0.00																													
1.00	METRO	CABLE AUTOMOTRIZ INDECO AWG #16 NEGRO	0.78	0.00																													
1.00	METRO	CABLE AUTOMOTRIZ INDECO AWG #16 NEGRO	1.18	0.00																													
1.00	UNIDAD	SERVICIO DE ENVIO DELIVERY CERCADO-JESUS MARIA	15.000	0.00																													
Valor de venta de Operaciones Crédito: S/ 0.00		Sub Total Ventas: S/ 262.87 Anticipo: S/ 0.00 Descuentos: S/ 0.00 Valor Venta: S/ 262.87 ITC: S/ 0.00 ICV: S/ 47.23 IGTPK: S/ 0.00 Otros Cargos: S/ 0.00 Dato Tributario: S/ 0.00 Partida de Ingresos: S/ 0.00 Importe Total: S/ 209.60																															
MON: TRESCIENTOS NOUVE Y 60/100 SOLES.																																	
Esta es una representación impresa de una factura electrónica generada por el Sistema de Facturación Electrónica del Perú.																																	

- Componentes adicionales

```

*** TAI LOY ****
TAI LOY S.A.
1
RUC: 20100049181
Ofic.Principal: Jr. Mariano Osorio 153
Urb.Miraflores Distrito: Surquillo
Prov:Lima Dpto:Lima
Direccion: Av. Genl Felipe Salaverry 2370 LS
0
5 Distrito: Jesus Maria Prov: Lima Dpto:
Lima

RUC CLIENTE: 20155945860 S/N: FACTURA DE
VENTA
FACTURA ELECTRONICA
F301-0064783
RAZ. SOCIAL: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLIC
A DEL PERU
605 3037230974
254075 TECLA+MOUSE INALAM PHILIPS 3BOT 100
P: 81.40 USD 1.00 81.40
SUBTOTAL: 68.98
OP.GRAVADA: 68.98
OP.EXONERADA: .00
OP.INAFECTA: .00
OP.GRATUITA: .00
IGV 18% 12.42
***IMP.TOTAL S/ 81.40

CANT. PRODUCTOS: 1

TF. 6193030 *** GRACIAS POR SU COMPRA ***
5/06/21 16:23:50 CAJTI130111
Rec: 301-0494999 YCR
    
```

```

CODIGO
BODE PERU S.A.C.
BY SALAVERRY 3310
LIMA LIMA MAGDALENA DEL MAR
S.U.C.I. 007991343
*
AV. FELIPE PASTIGAO SALAVERRY
2370 DPT.001 DC.301- C.C.REAL
PLAZA SALAVERRY-JESUS MARIA-LI
MA-LIMA
TEL: 011 44118871

FACTURA ELECTRONICA
F740-20170

FECHA EMISION: 05/06/2021 MON: 133.9142
CODIGO CANT. PREC. UNID. DPTO TOTAL
DESCRIPCION
741004333180
CABLE VEHIC N - N VI 4 AN 0.90 ARROZ/MY
1 29.90
OP. GRAVADAS S/ 33.91
OP. GRATUITAS S/ 0.00
OP. EXONERADAS S/ 0.00
OP. INAFECTAS S/ 0.00
TOTAL INC. GLOBAL S/ 0.00
I.C.V. S/ 0.00
TOTAL VENTA S/ 33.91
TARJETA VISA S/ 33.90

MON: TREINTA Y SEVE
CON 30/100 SOLES

RUC. ART. 1 2 T.C. 1 3.822
CAJA: BROCADAO
CERROJO: VILELA KIMBERLY
S.U.C. 1 211300000
MONDE: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOL
ICA DEL PERU
DIPARTIDO: LIMA
CORREO: 1 10262309000.28
    
```

E.5. Costos adicionales para el modo de uso por ROV

- Conector DBH13M

Particular Universidad Católica del Perú		MacArtney Inc.		
Avenida Mendocoro, +51 0146851174 Perú-RUC: 20189946600		2001 W Sam Houston Pkwy N Suite D-200 Houston, TX 77062		
		Phone No:	+1713-266-7575	
		Fax:	+1713-266-7519	
		Website:	www.macartney.com	
		E-Mail:	info.us@macartney.com	
		Tax ID:	76-0560867	
		Revision:	1	
		Quotation	US177597	
Delivery Time:	In stock, subject to change	Date:	03 November 2023	
Payment Terms:	To be agreed	Our Reference:	Jacobo Aguilar	
Delivery Mode:	Ex works Houston		Jacobo Aguilar	
Validity:	30 days	Your Ref.:	Renzo Martín Mendocoro Robaina	
End User:	Particular Universidad Cat	Customer No.:	2867	
No.	Description	Qty.	Price	USD
With reference to your inquiry, we are pleased to quote:				
01210506	***Version en bronce** DBH13M w/1m Cable cable (brass) Incl. RJ45 connector	1	207.44	207.44
01210528	***Version en SS** DBH13M55 w/1m Cable cable Incl. RJ45 connector	1	226.88	226.88
			Total USD	434.32
QUOTATION: Please note clock levels change daily and are subject to prior sales.				
We hope you will find our proposal satisfactory and look forward to your response.				

- Barras para fabricación de sellos laterales

Cesta (1)

¡Nuevo! Comienza el 25 nov a las 02:00 PT

Seleccionar (nada)

✓ **Sigan Technology Co.,LTD** 



6061 T6 aluminum flat bar all sizes, in stock & CUSTOMIZED length aluminum alloy bar rod s haft

US \$12.00

¡Nuevo! US \$11.60

Envío: US \$15.64 por Air Express,Standard Shipping
Fecha estimada de entrega el 23 DIC :)

— 1 — +

Resumen del pedido




Subtotal	US \$24.00
Envío	US \$15.64
Total	US \$39.64

(Aplicar PER 155,35)

Ver detalles

- Luces submarinas y conectores

SHOPPING CART

	<p>Outland Technology OT1-UWL-401 LED Light</p> <p>SKU: OT1-UWL-401</p> <p style="font-size: small; color: #ccc;">View Product</p>	\$261.20	1	\$2,246.32	Update Remove
	<p>RMC-3-FS In-Line Rubber Molded Connector-3 Socket Female</p> <p>SKU: RMC3-FS</p> <p style="font-size: small; color: #ccc;">View Product</p> <p style="font-size: x-small; color: #e91e63;">No Free Shipping</p>	\$30.45	4	\$121.80	Update Remove
<div style="display: flex; align-items: center;">  <div> <p>100% Satisfaction Guaranteed</p> <p style="font-size: x-small;">It is Amazon's policy to provide the finest quality products and the highest level of customer service. If you are not completely satisfied with your purchase you may return or exchange your product.</p> <p style="font-size: x-small; color: #0070c0;">Read More</p> </div> </div>					
<p style="font-size: small; color: #ccc;">Do you have a promo code?</p>					
<p style="font-size: small; color: #ccc;">Subtotal</p> <p style="font-size: small; color: #ccc;">Tax</p> <p style="font-size: small; color: #ccc;">Calculate Shipping and Tax</p>					<p>\$2,567.12</p> <p>\$0.00</p>
<p style="font-size: small; color: #ccc;">Cart total</p>					<p>\$2,567.12</p>

- Fabricación de sellos laterales

					
RUC: 2012749931		CITIZACION N° 2021-06561			
Señores: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU		Los Olivos, 17 de Noviembre del 2021			
Presente.-					
Atención: Sr. Benzo Montoya Rabanal					
Estimados señores:					
En atención a su amable solicitud, nos es grato realizarle lo siguiente:					
IT	CANT	Unid	DESCRIPCION	PRECIO UNIT USD	PRECIO TOTAL USD
001	1.00	Unid	Fabricación de ACOPLE UNIVERSAL Según plano N° 84-012-A4 Plata: Aluminid Este	90.000	90.00
				Total USD	90.00
				Desc 0.00%	(0.00)
Condiciones Comerciales:				BASE USD	90.00
Tiempo de Ejecución: 07 días hábiles				I.O.Y USD	14.00
Forma de Pago: Crédito 07 días				TOTAL USD	104.00
A la espera de sus graciosos comentarios, quedamos de usted					
Atentamente, INDUSTRIAS SIGMA S.R.L.					

ANEXO F: Planos mecánicos y electrónicos

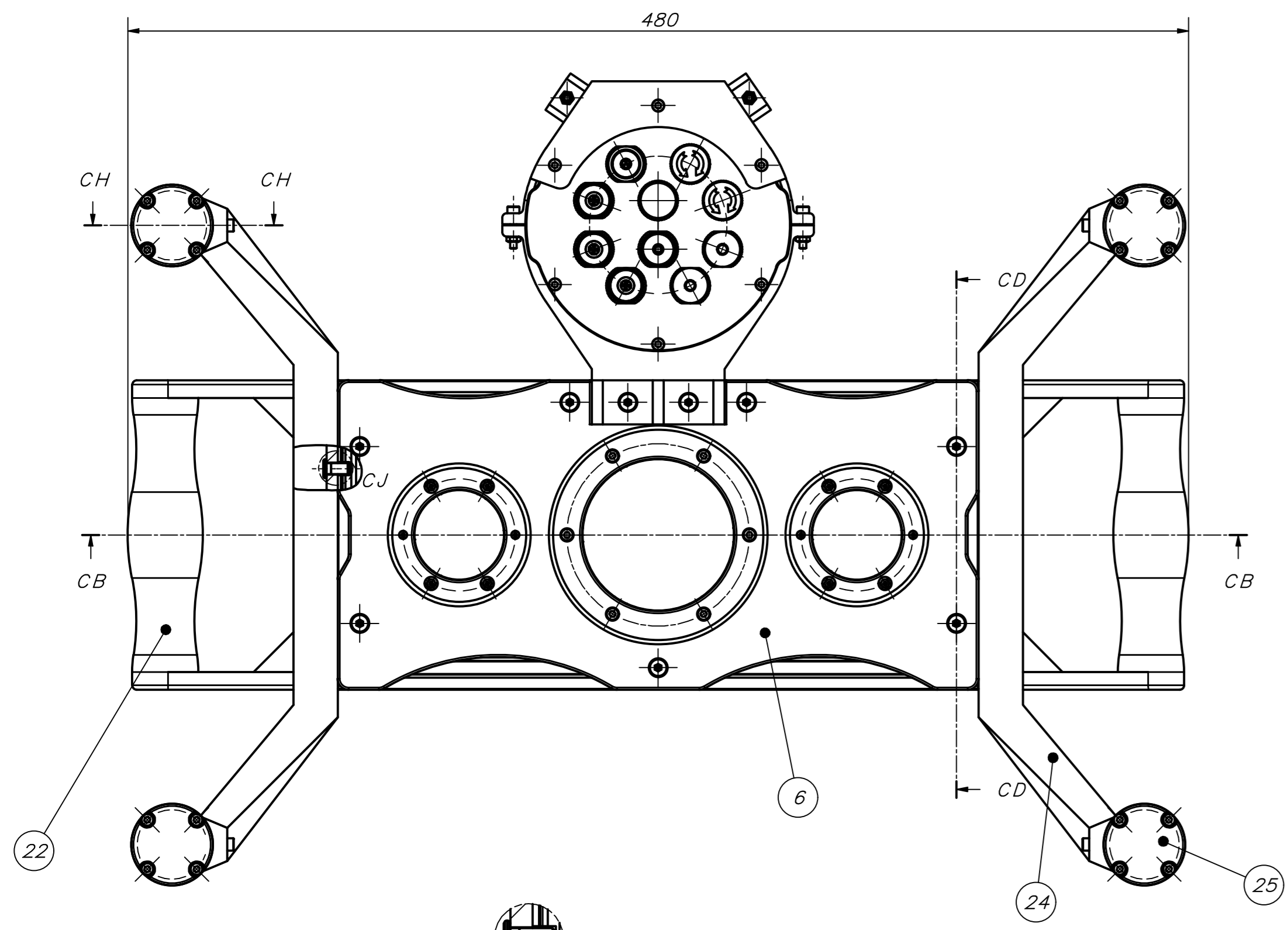
Tabla F.1: Lista de planos mecánicos (Fuente: Elaboración propia).

Grupo	Tipo	Tamaño	Nombre	Código
0	Ensamble	A0	Ensamble general	G0-E01-A0
	Ensamble	A0	Ensamble general - 750m	G0-E02-A0
1	Ensamble	A2	Enclosure secundario lateral	G1-E01-A2
	Despiece	A4	Soporte de cámara lateral	G1-D01-A4
2	Ensamble	A1	Enclosure secundario lateral	G2-E01-A1
	Despiece	A3	Soporte de cámara central	G2-D01-A3
	Despiece	A4	Seguidor de cámara central	G2-D02-A4
	Ensamble	A1	Enclosure secundario lateral - 750m	G2-E02-A1
	Despiece	A3	Sello lateral de 3" para penetrators	G2-D03-A3
3	Ensamble	A2	Enclosure principal	G3-E01-A2
	Ensamble	A2	Subensamble de bandeja	G3-E02-A2
	Despiece	A4	Soporte delantero de bandeja	G3-D01-A4
	Despiece	A4	Soporte trasero de bandeja	G3-D02-A4
	Despiece	A4	Unión paralela	G3-D03-A4
	Despiece	A4	Sujetador de batería	G3-D04-A4
	Despiece	A3	Bandeja de componentes	G3-D05-A3
	Ensamble	A3	Enclosure principal - 750m	G3-E03-A3
	Ensamble	A2	Subensamble de bandeja - 750m	G3-E04-A2
	Despiece	A3	Sello lateral de 4" cerrado	G3-D06-A3
	Despiece	A3	Sello lateral de 4" para penetrators	G3-D07-A3
4	Ensamble	A3	Estructura de soporte	G4-E01-A3
	Despiece	A3	Sujetador de luces	G4-D01-A3
	Despiece	A4	Sop. enclosure secundario lateral	G4-D02-A4
	Despiece	A4	Sop. enclosure secundario central	G4-D03-A4
	Despiece	A3	Base de soporte derecha	G4-D04-A3
	Despiece	A3	Base de soporte izquierda	G4-D05-A3
	Despiece	A4	Sop. inferior de enclosure principal	G4-D06-A4
	Despiece	A3	Sop. superior delantero de enc. principal	G4-D07-A3
	Despiece	A3	Sop. superior trasero de enc. principal	G4-D08-A3
	Despiece	A3	Sujetador manual	G4-D09-A3
	Despiece	A4	Cubierta delantera	G4-D10-A4
	Despiece	A4	Cubierta lateral	G4-D11-A4
5	Despiece	A4	Sujetador de luces	G5-D01-A4
	Despiece	A4	Complemento sujetador de luces	G5-D02-A4
	Despiece	A3	Sop. superior delantero de enc. principal	G5-D03-A3
	Despiece	A3	Sop. superior trasero de enc. principal	G5-D04-A3
	Despiece	A4	Acople universal	G5-D05-A4

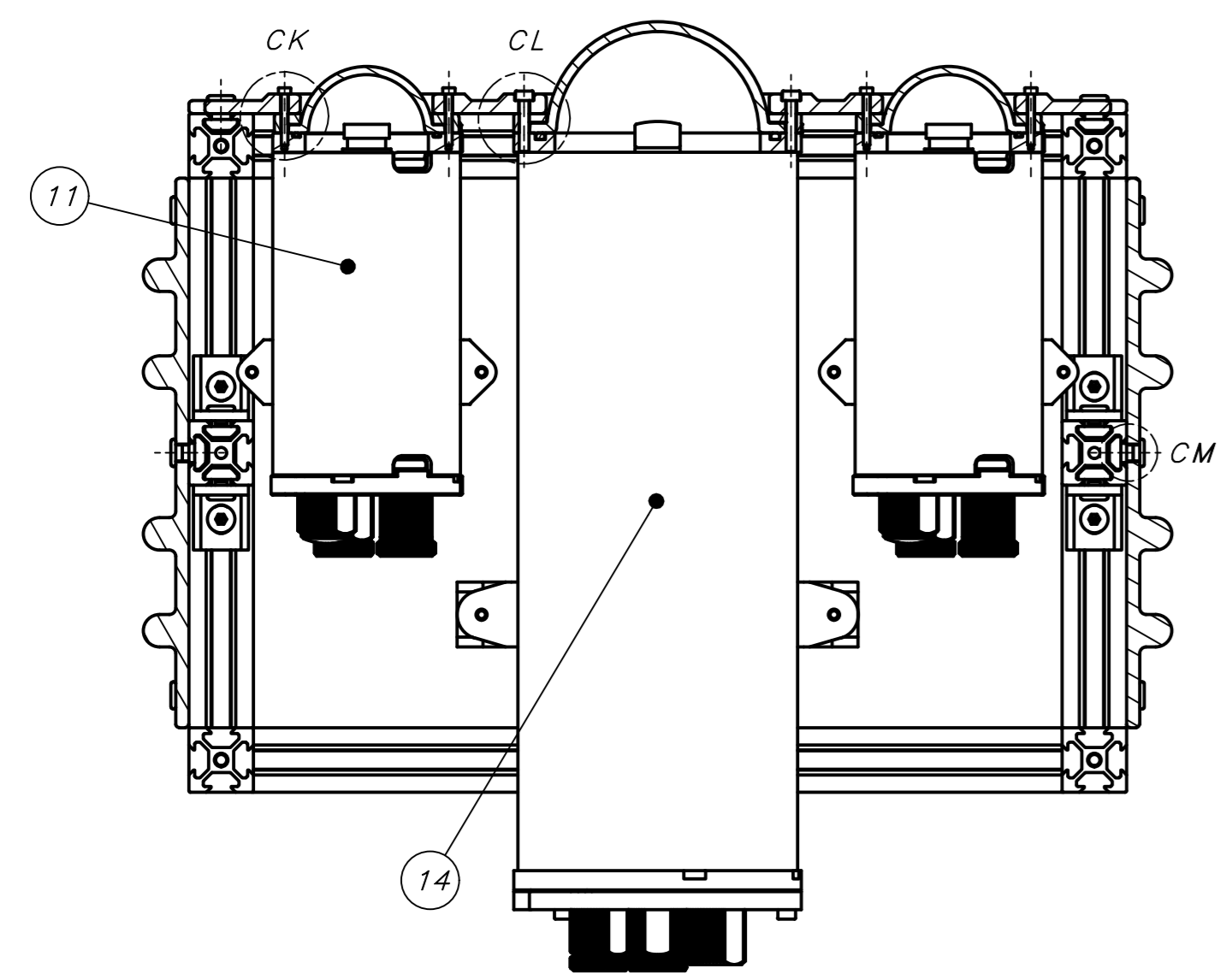
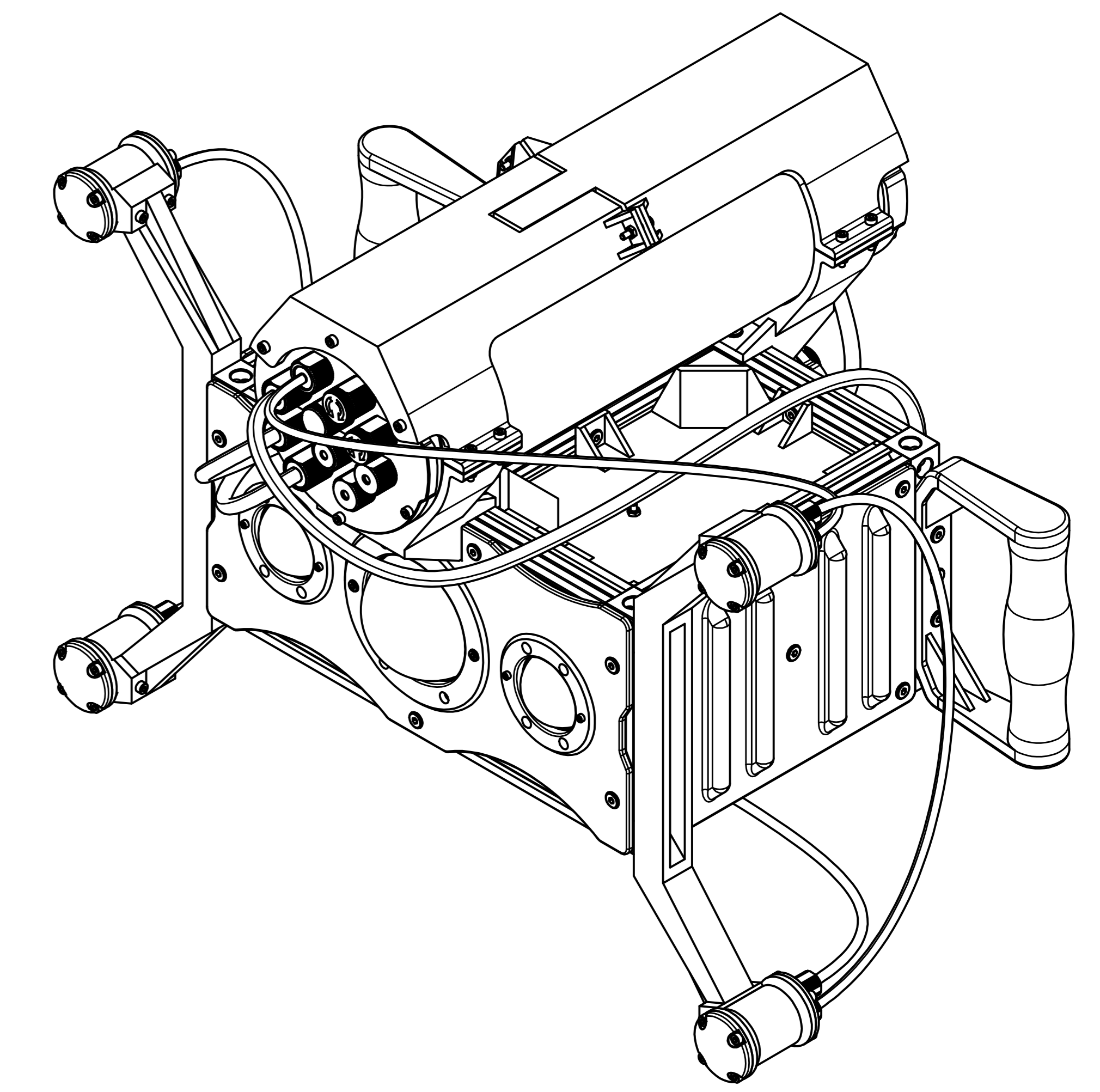
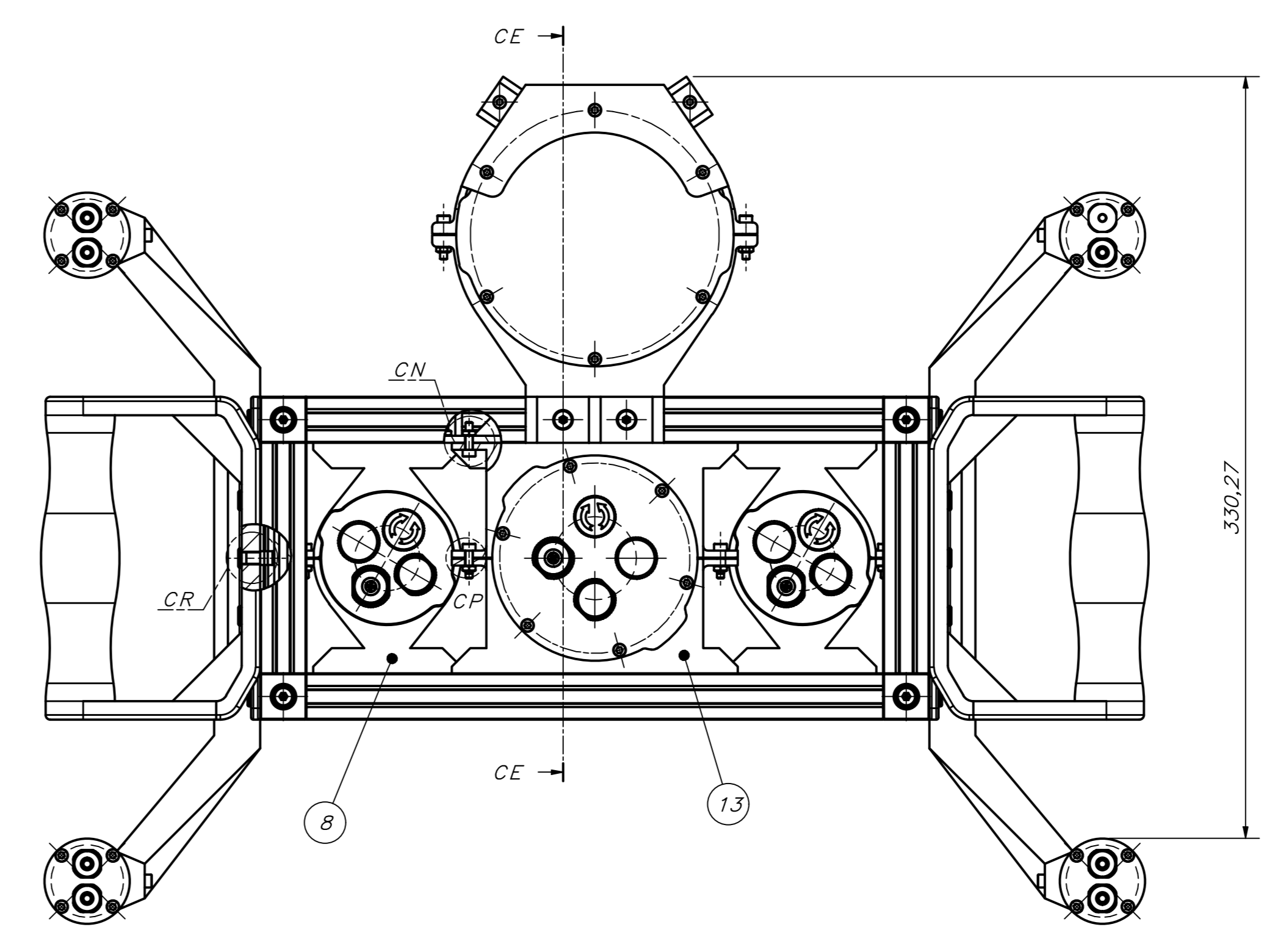
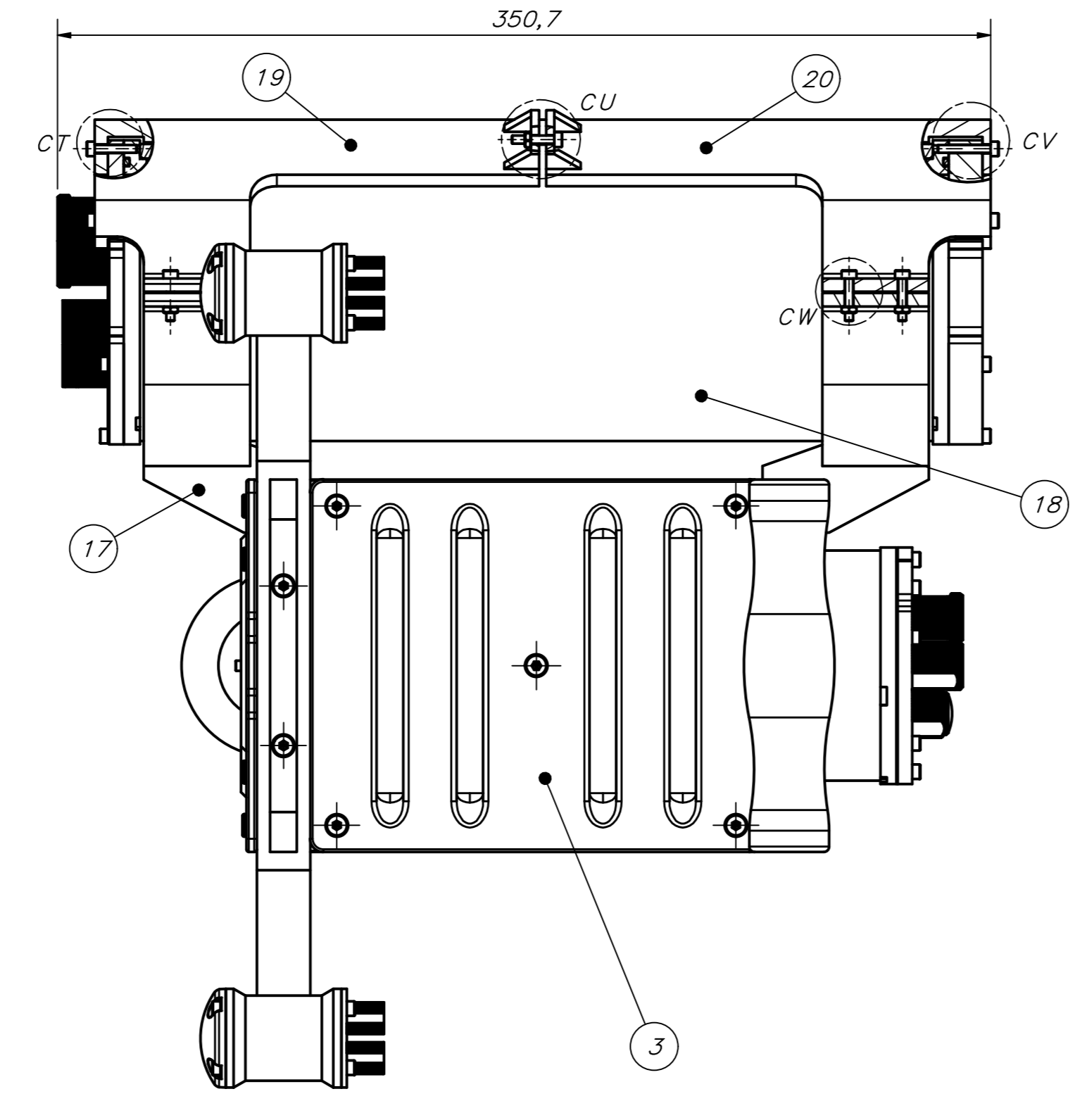
Tabla F.2: Lista de planos electrónicos (Fuente: Elaboración propia).

Grupo	Tipo	Tamaño	Nombre	Código
1	Esquemático	A4	Placa de circuito impreso	E1-01-A4
	Placa	A4	Placa de circuito impreso – vista top	-
	Placa	A4	Placa de circuito impreso – vista bottom	-
2	Esquemático	A4	Shield Jetson Nano	E1-02-A4
	Placa	A4	Shield Jetson Nano– vista top	-
	Placa	A4	Shield Jetson Nano– vista bottom	-
3	Esquemático	A4	Diagrama esquemático completo – Buzo	EE1-A4
	Esquemático	A4	Diagrama esquemático completo – ROV	EE2-A4

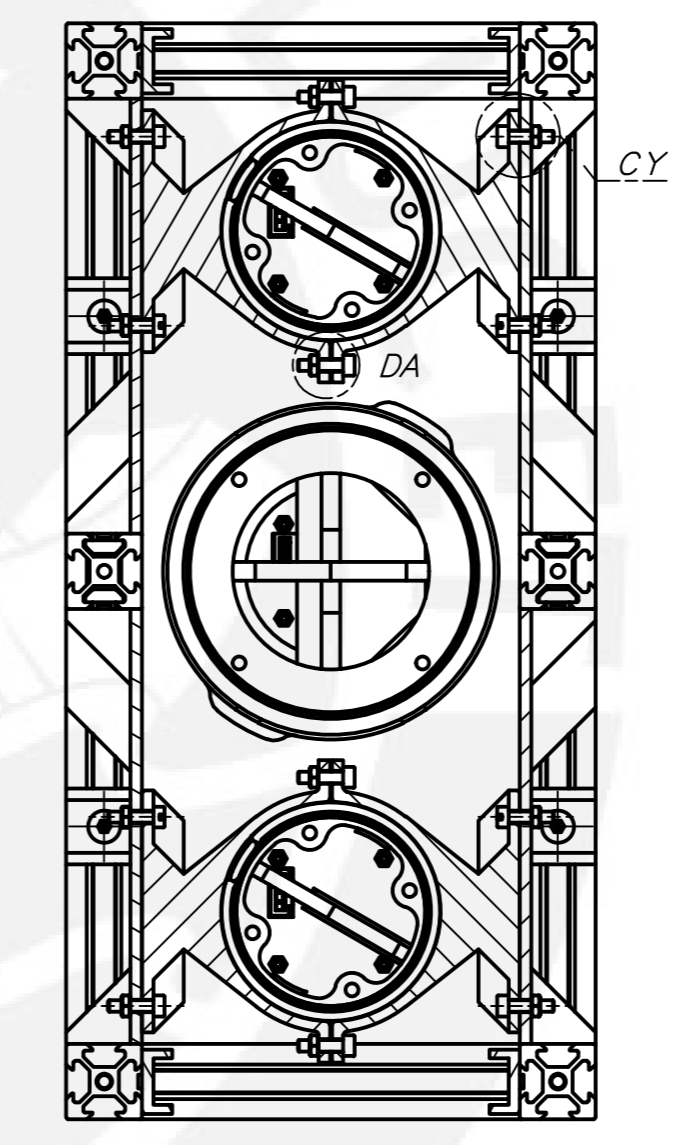
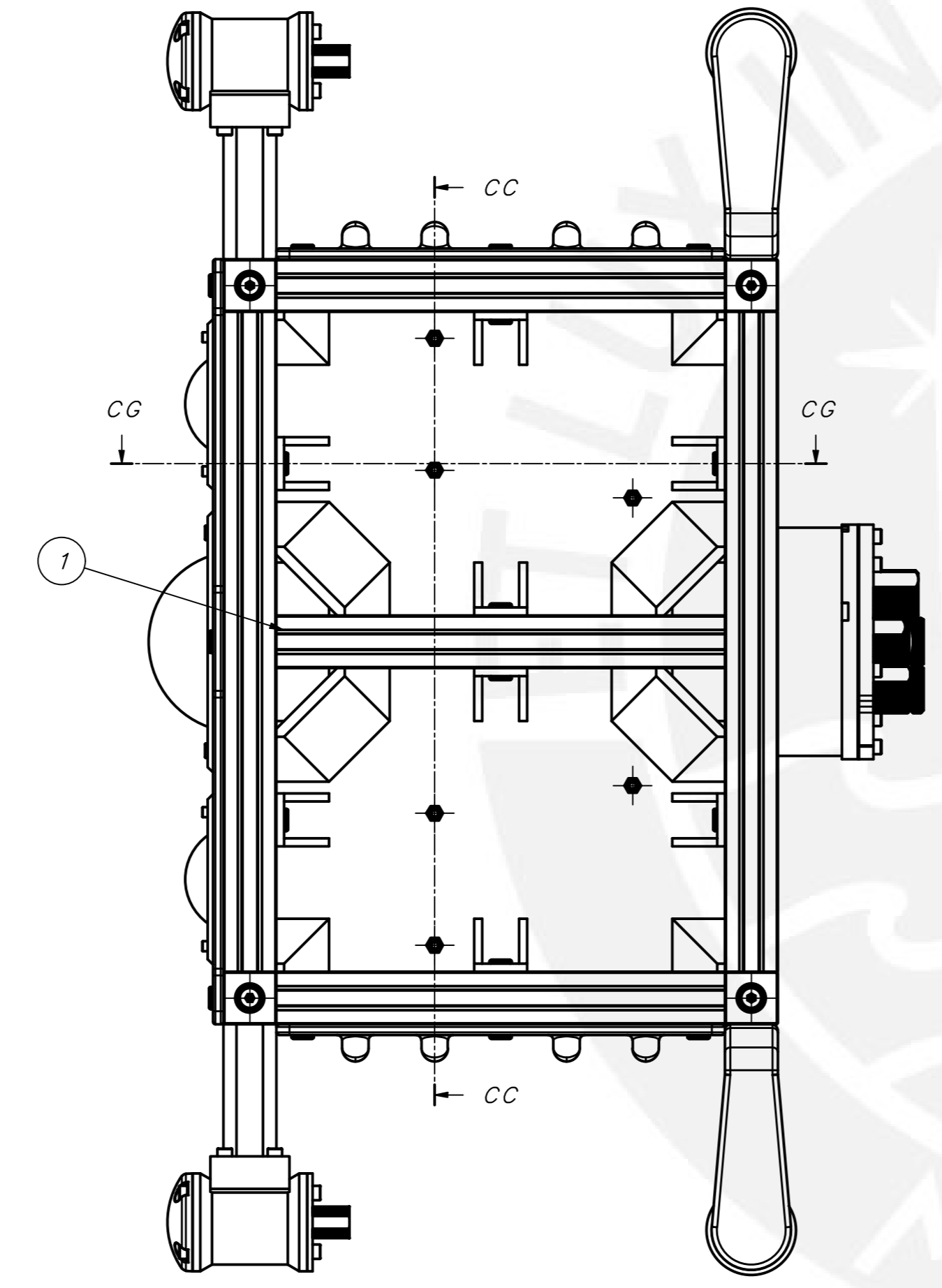




DETALLE CJ
ESCALA 1 : 1



CORTE CB-CB



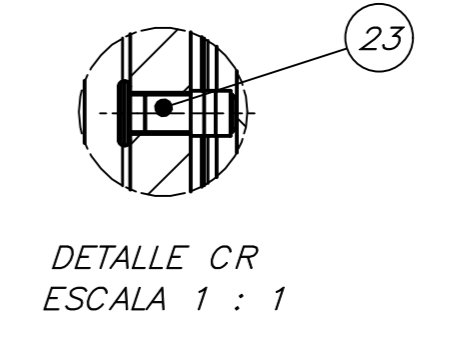
CORTE CC-CC



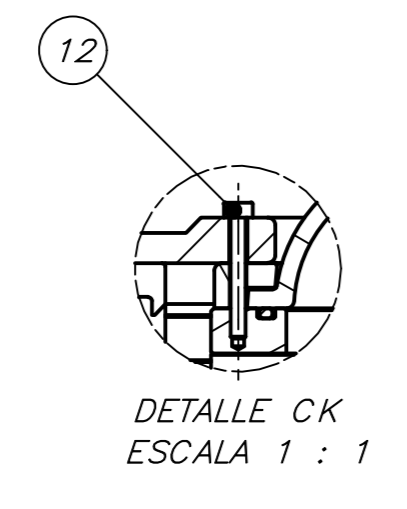
DETALLE CN
ESCALA 1 : 1



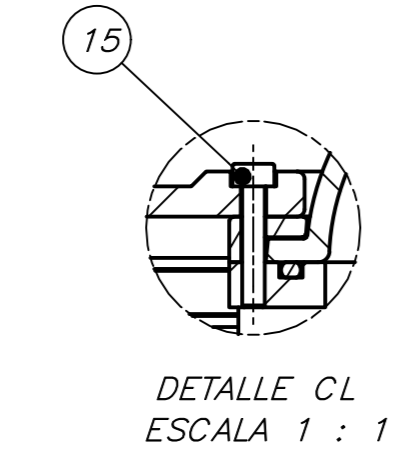
DETALLE CP
ESCALA 1 : 1



DETALLE CR
ESCALA 1 : 1



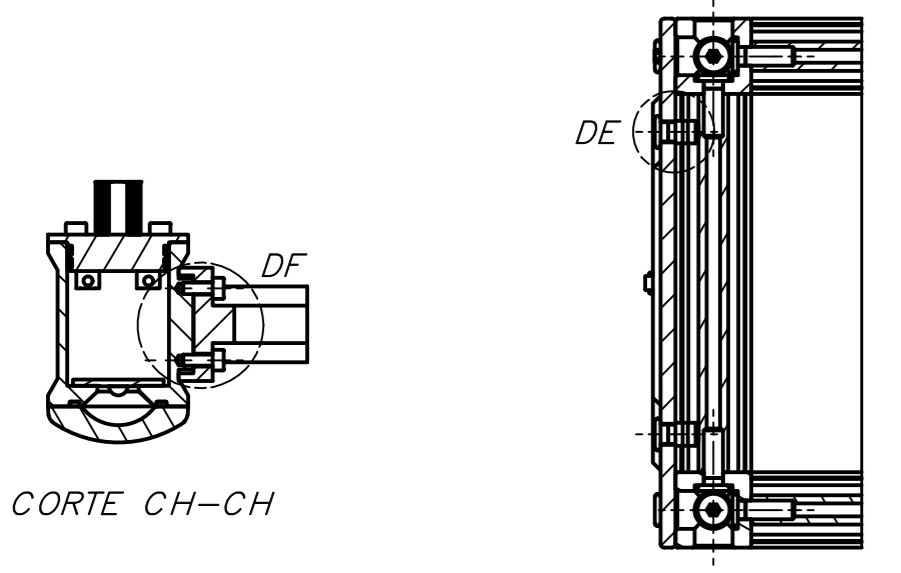
DETALLE CK
ESCALA 1 : 1



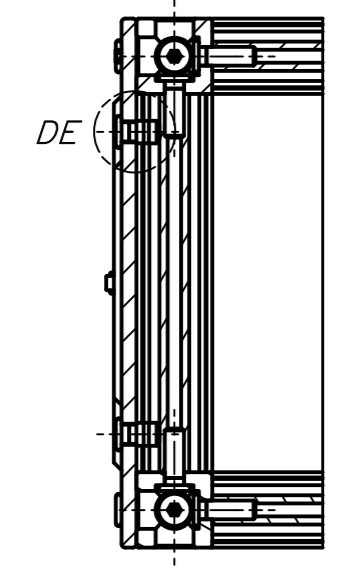
DETALLE CL
ESCALA 1 : 1



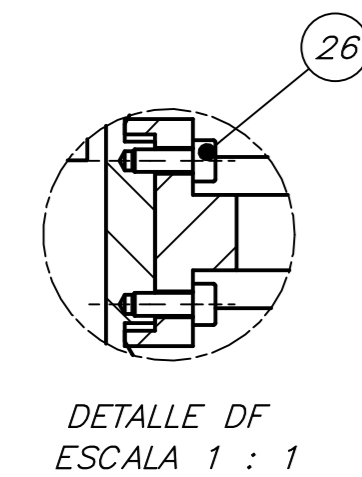
DETALLE CM
ESCALA 1 : 1



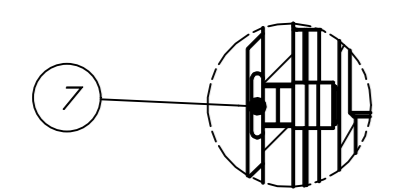
CORTE CH-CH



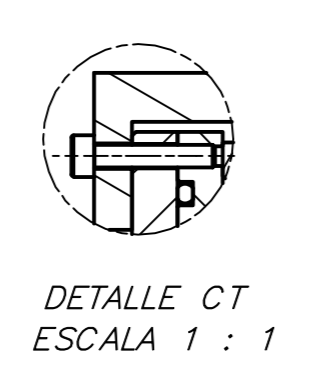
CORTE CD-CD



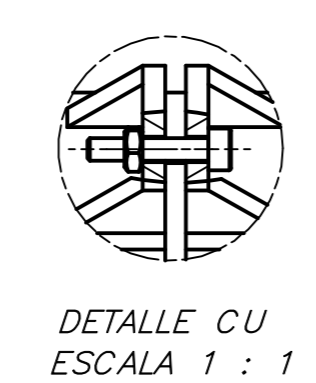
DETALLE DF
ESCALA 1 : 1



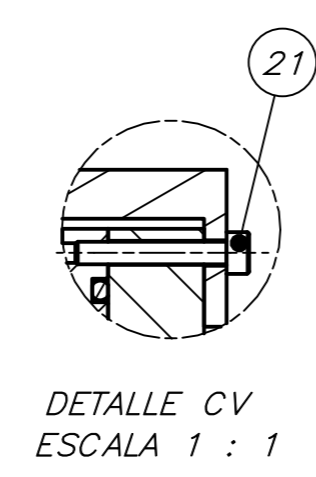
DETALLE DE
ESCALA 1 : 1



DETALLE CT
ESCALA 1 : 1



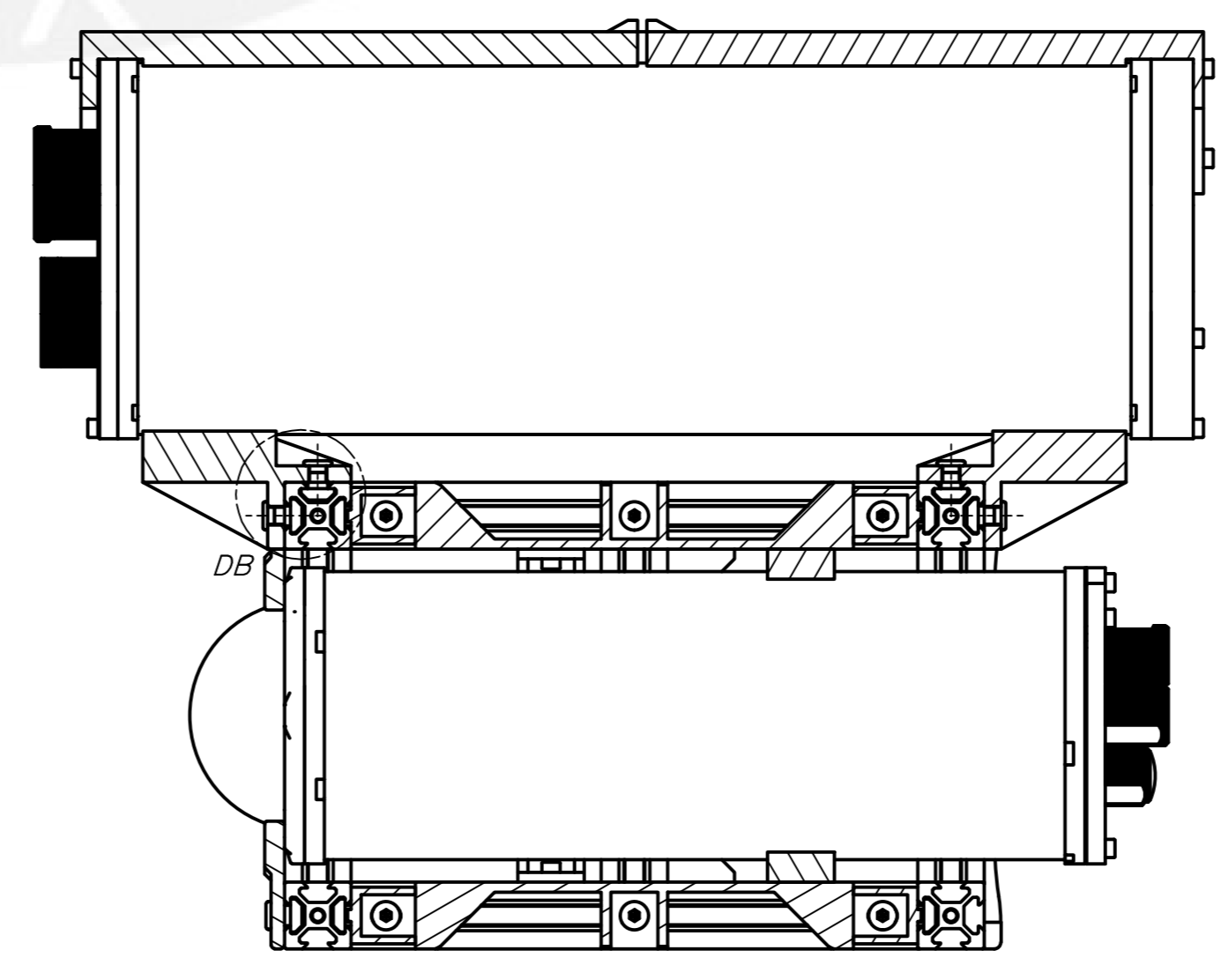
DETALLE CU
ESCALA 1 : 1



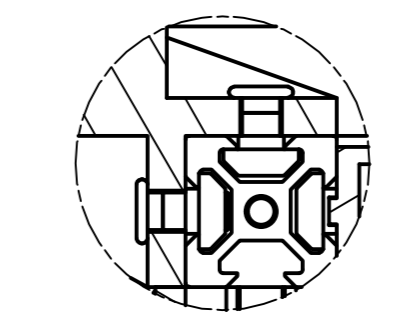
DETALLE CV
ESCALA 1 : 1



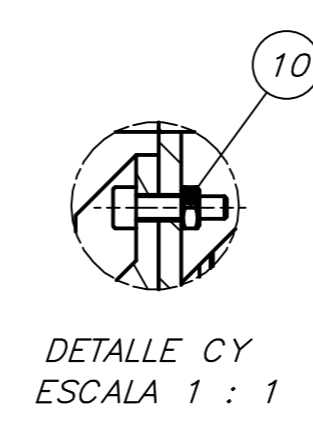
DETALLE CW
ESCALA 1 : 1



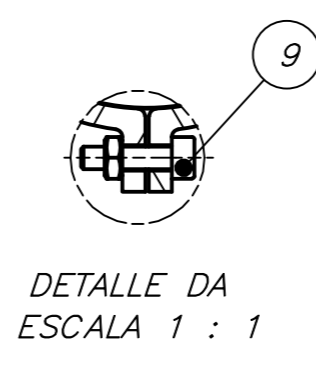
CORTE CE-CE



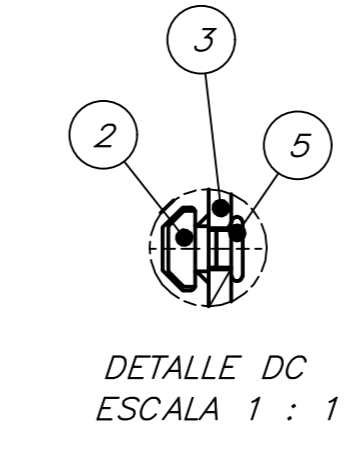
DETALLE DB
ESCALA 1 : 1



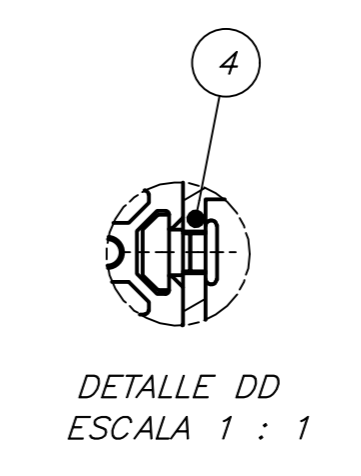
DETALLE CY
ESCALA 1 : 1



DETALLE DA
ESCALA 1 : 1

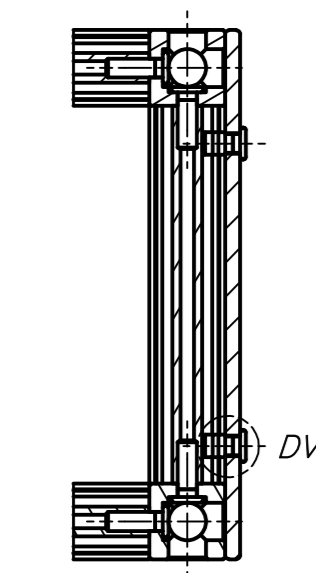


DETALLE DC
ESCALA 1 : 1

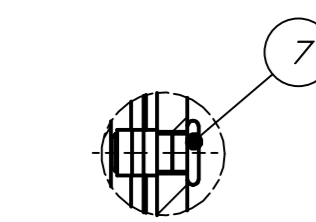


DETALLE DD
ESCALA 1 : 1

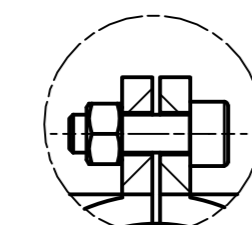
POS. CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES	
26	8	TORNILLO ALLEN M3X8	ISO 4762	ASI 304	-
25	2	LUCES SUBMARIAS	-	-	PARABRISOS - UNIM SUBSEA LIGHT PRE-CONNECTED SET
24	2	SUJETADOR DE LUCES	-	COMPUESTO PLA-CFRP	04-001-A3
23	6	TORNILLO DE BAJA PERFIL M3X14	-	ACERO AL CARBONO	-
22	2	SUJETADOR MANUAL	-	COMPUESTO PLA-CFRP	04-000-A2
21	3	TORNILLO ALLEN M3X20	ISO 4762	ASI 304	-
20	1	SOP. SUP. TRASERO DE ENC. PRINCIPAL	-	COMPUESTO PLA-CFRP	04-000-A2
19	1	SOP. SUP. DELANTERO DE ENC. PRINCIPAL	-	COMPUESTO PLA-CFRP	04-001-A3
18	1	ENCLOSURE PRINCIPAL	-	-	02-000-A2
17	2	SOP. INF. DE ENC. PRINCIPAL	-	COMPUESTO PLA-CFRP	04-011-A4
16	2	CUBIERTA LATERAL	-	COMPUESTO PLA-CFRP	04-011-A4
15	15	TORNILLO ALLEN M3X16	ISO 4762	ASI 304	-
14	1	ENCLOSURE SECUNDARIO CENTRAL	-	-	02-001-A2
13	2	SOP. ENCLOSURE SECUNDARIO CENTRAL	-	COMPUESTO PLA-CFRP	04-002-A4
12	4	TORNILLO ALLEN M3X16	ISO 4762	ASI 304	-
11	2	ENCLOSURE SECUNDARIO LATERAL	-	-	02-001-A2
10	26	TUERCA HEXAGONAL M3	ISO 4032	ASI 304	-
9	18	TORNILLO ALLEN M3X12	ISO 4762	ASI 304	-
8	4	SOP. ENCLOSURE SECUNDARIO LATERAL	-	COMPUESTO PLA-CFRP	04-002-A4
7	29	TORNILLO DE BAJA PERFIL M3X10	-	ACERO AL CARBONO	-
6	1	CUBIERTA DELANTERA	-	COMPUESTO PLA-CFRP	04-010-A4
5	16	TORNILLO DE BAJA PERFIL M3X8	-	ACERO AL CARBONO	-
4	2	BASE DE SOPORTE IZQUIERDA	-	-	04-000-A2
3	2	BASE DE SOPORTE DERECHA	-	-	04-001-A3
2	51	T-NUT	-	A4061	-
1	1	ESTRUCTURA DE SOPORTE	-	-	04-001-A3



CORTE DA-DA



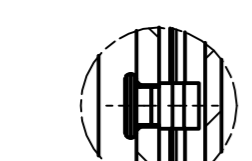
DETALLE DV
ESCALA 1 : 1



DETALLE DR
ESCALA 1 : 1



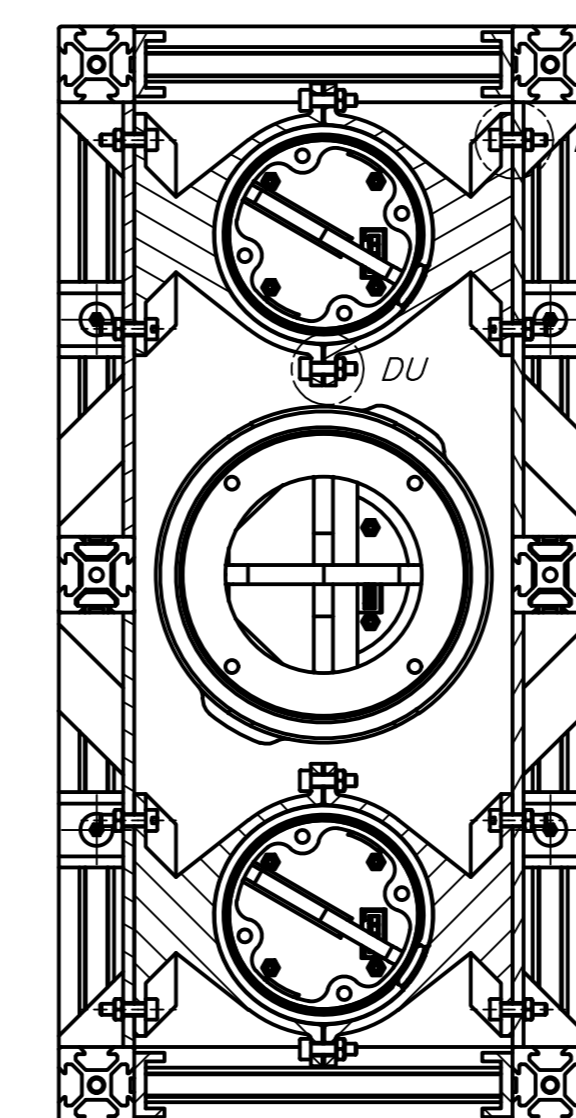
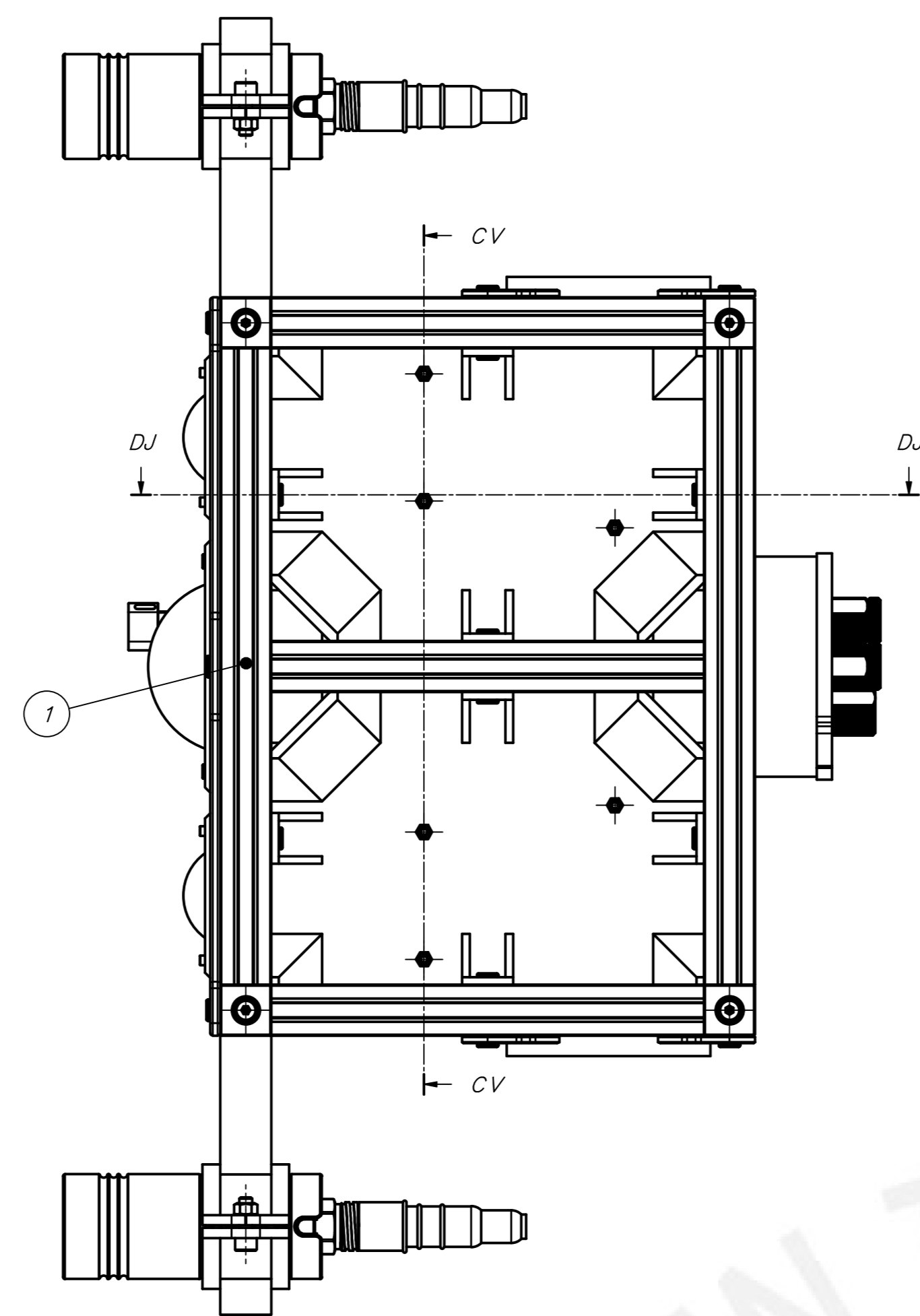
DETALLE DM
ESCALA 1 : 1



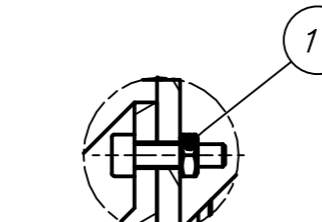
DETALLE DN
ESCALA 1 : 1



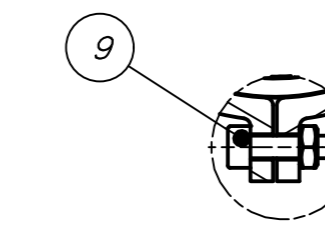
DETALLE DP
ESCALA 1 : 1



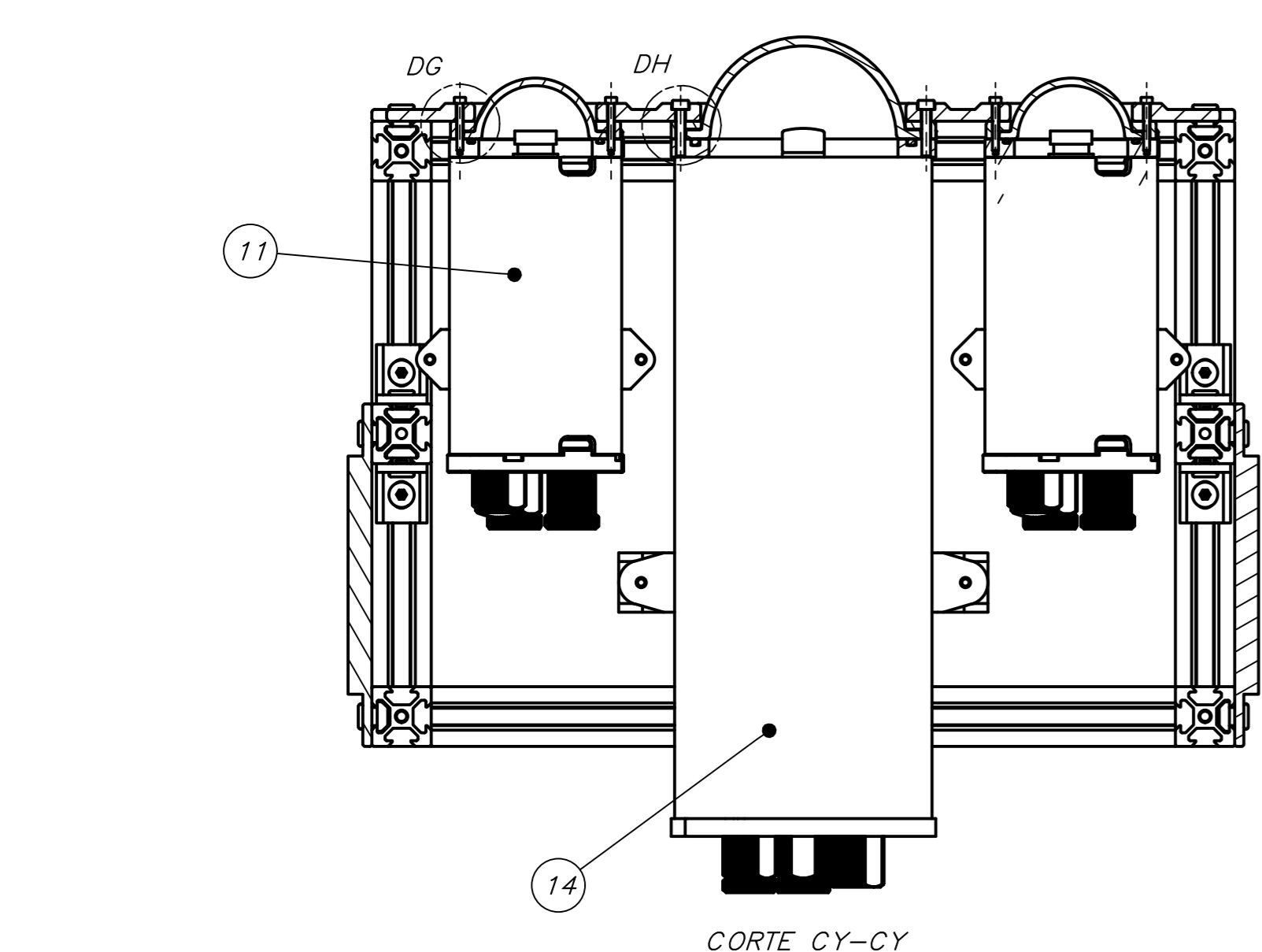
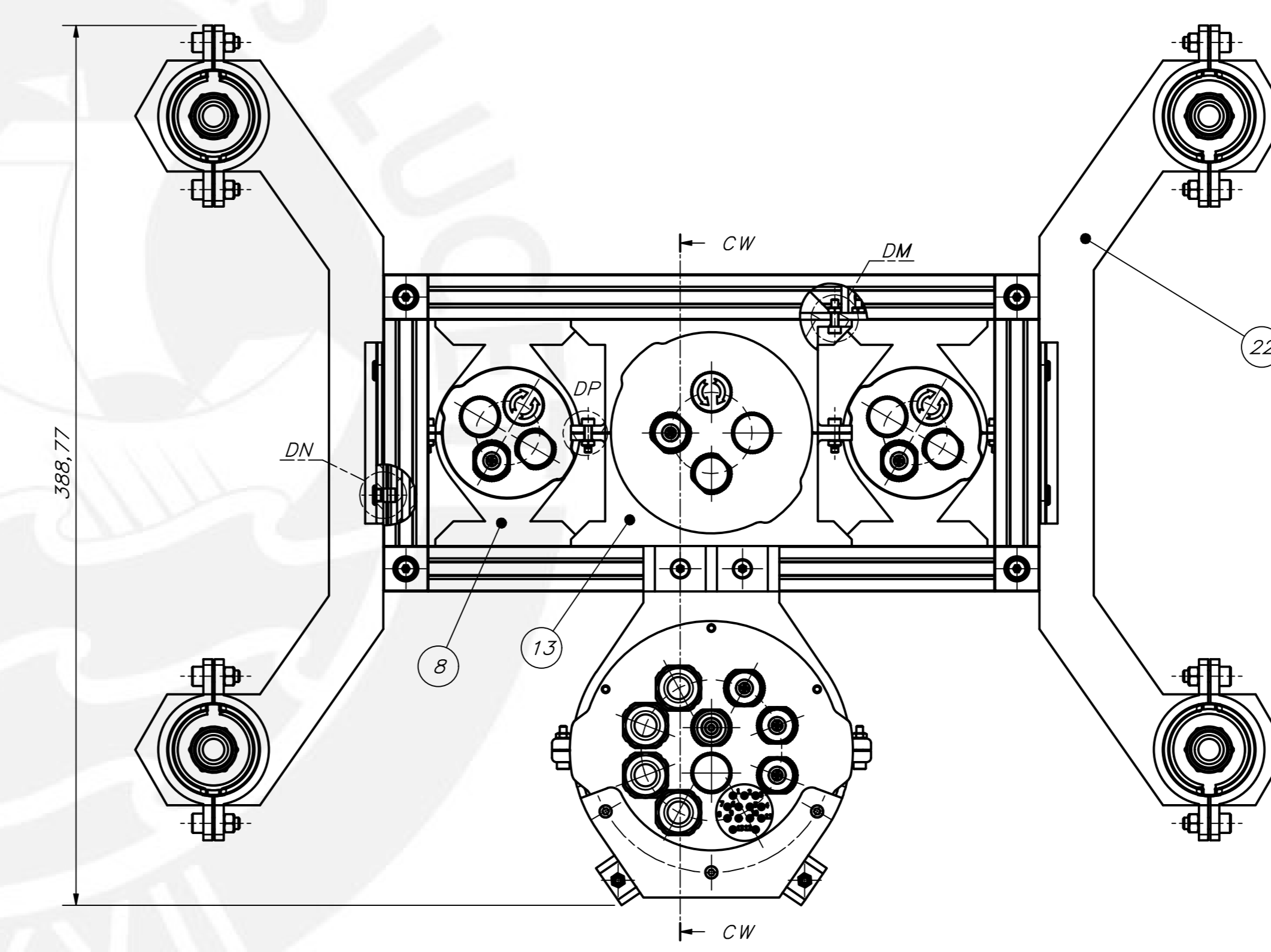
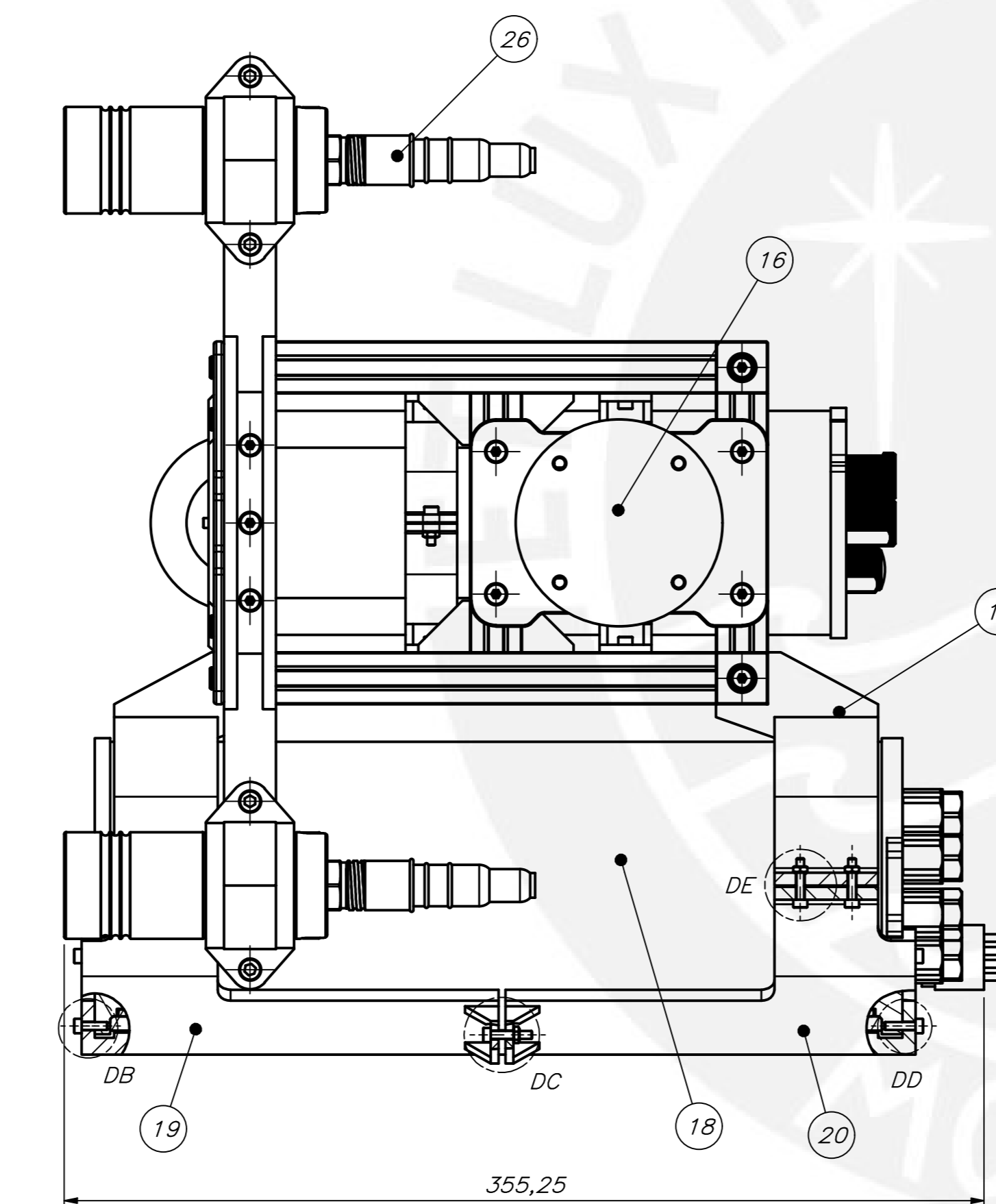
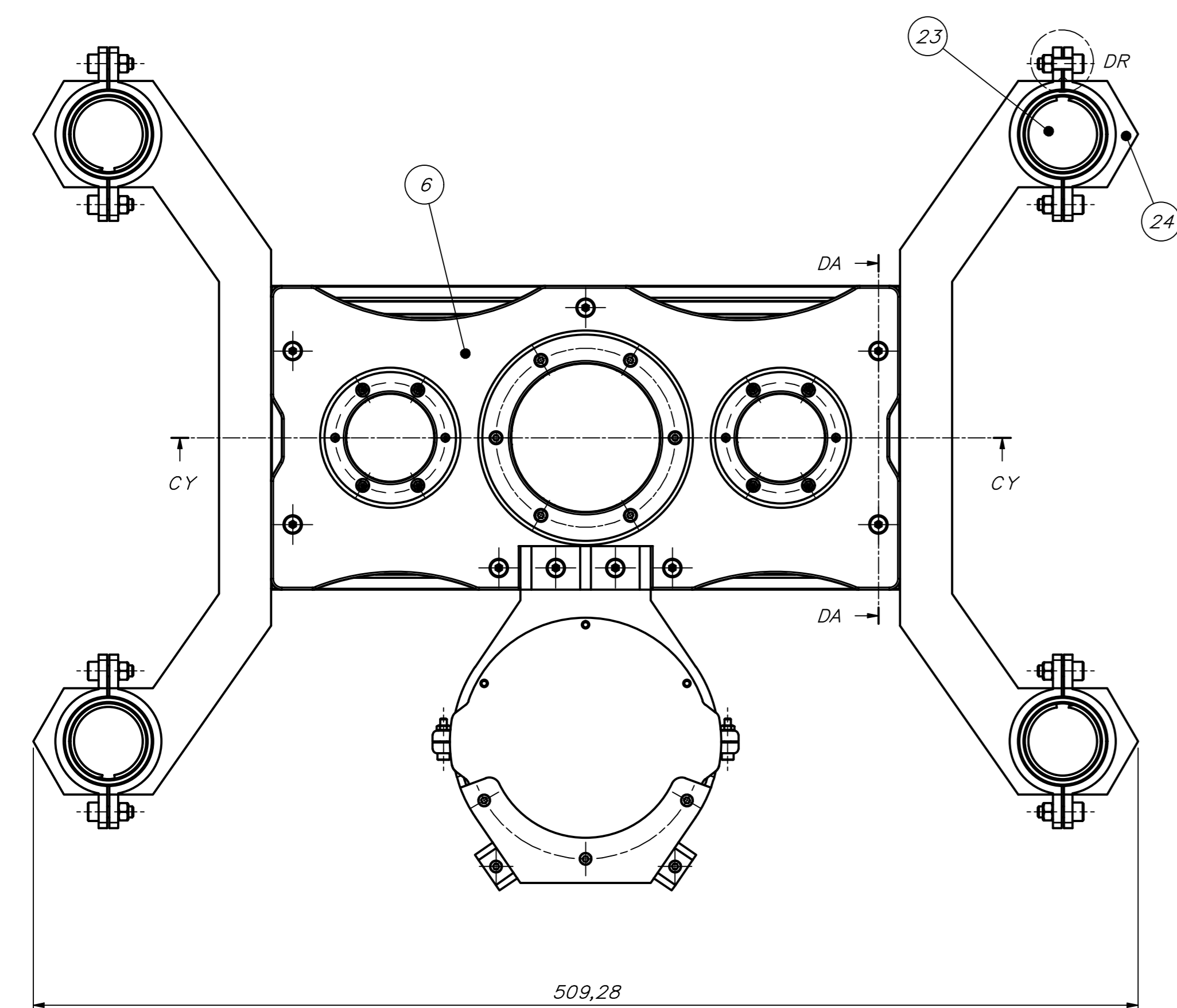
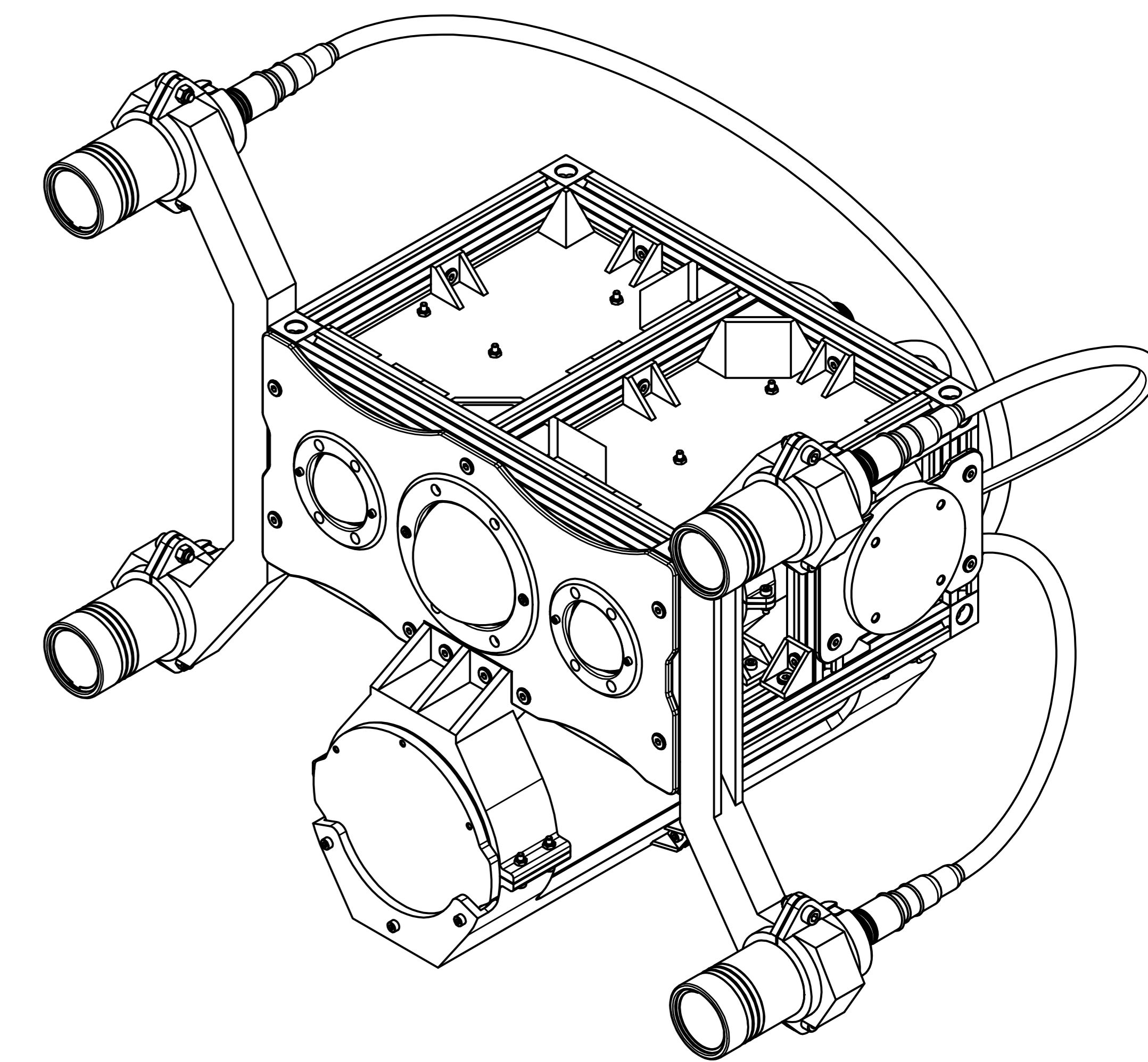
CORTE CV-CV



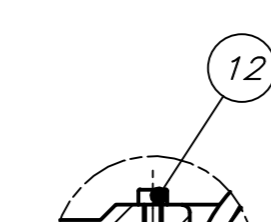
DETALLE DT
ESCALA 1 : 1



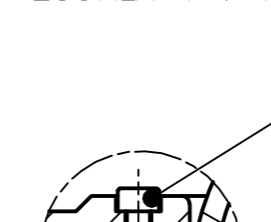
DETALLE DU
ESCALA 1 : 1



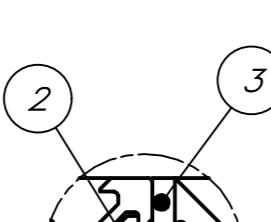
CORTE CY-CY



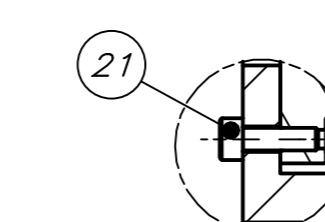
DETALLE DG
ESCALA 1 : 1



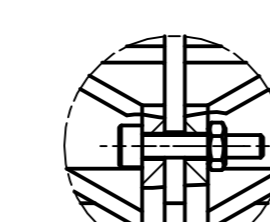
DETALLE DH
ESCALA 1 : 1



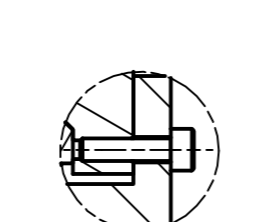
DETALLE DK
ESCALA 1 : 1



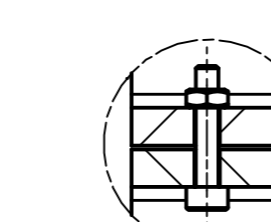
DETALLE DB
ESCALA 1 : 1



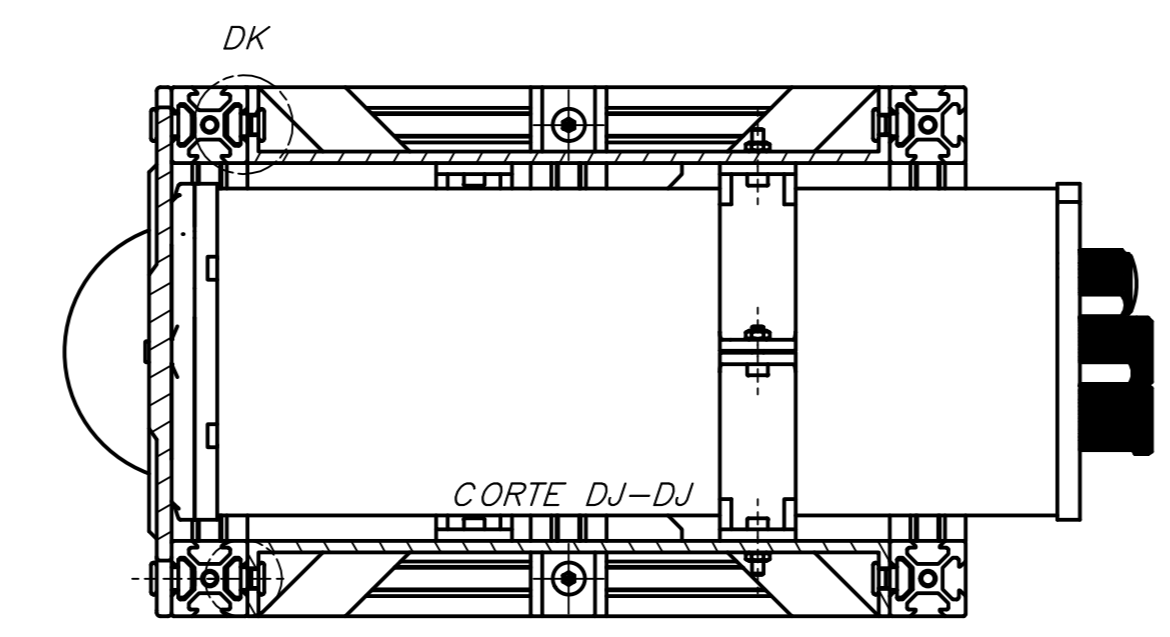
DETALLE DC
ESCALA 1 : 1



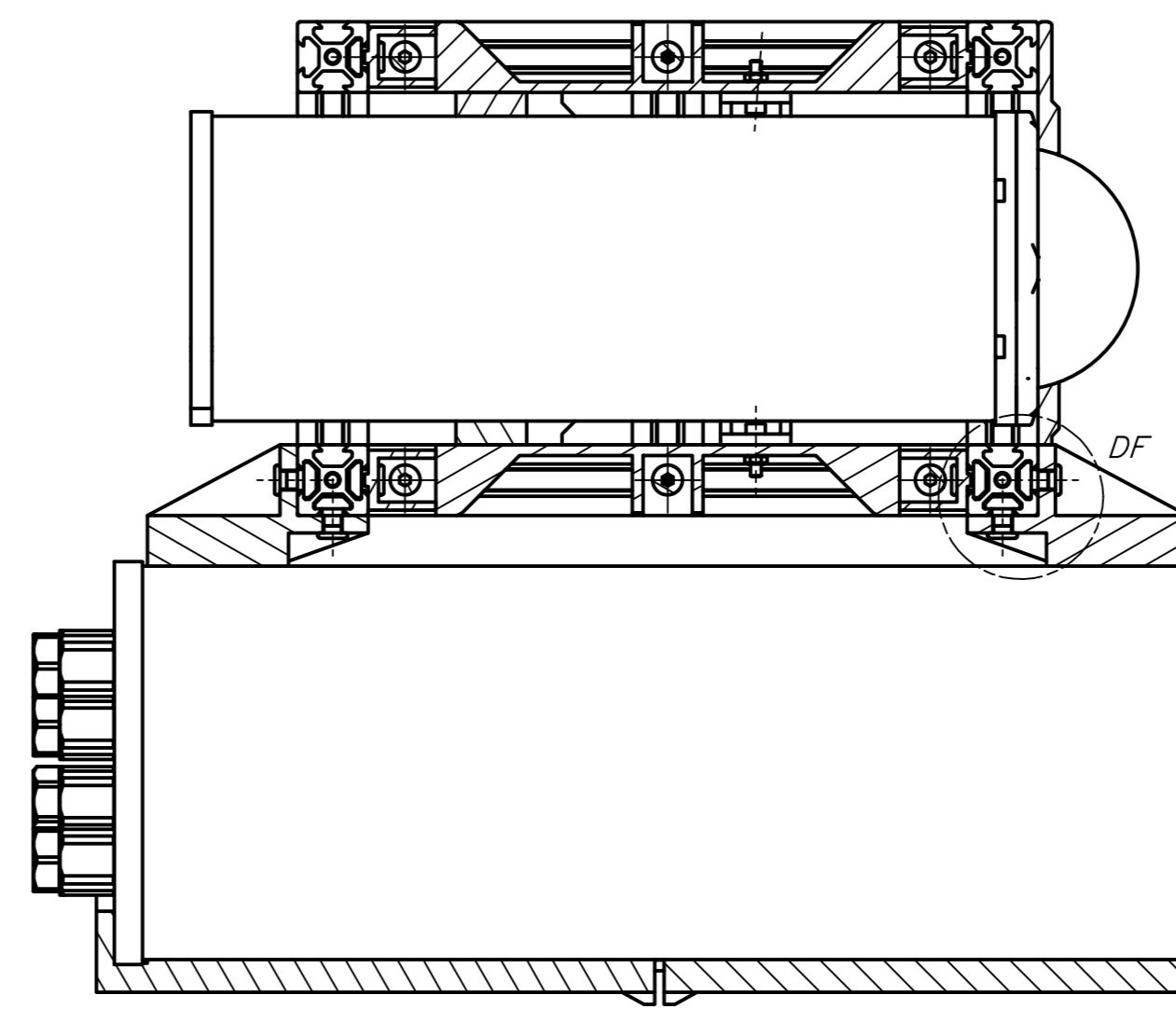
DETALLE DD
ESCALA 1 : 1



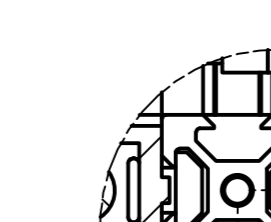
DETALLE DE
ESCALA 1 : 1



CORTE DJ-DJ



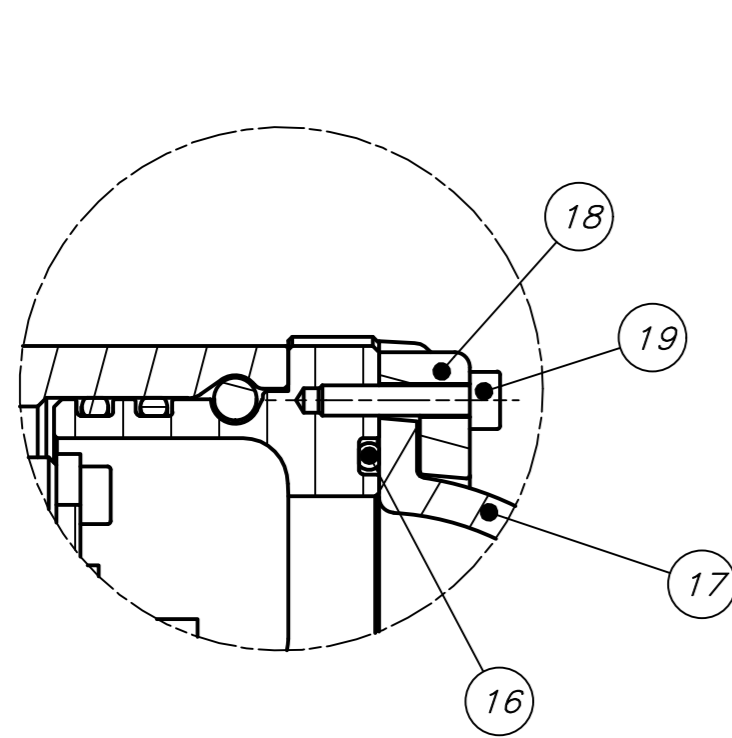
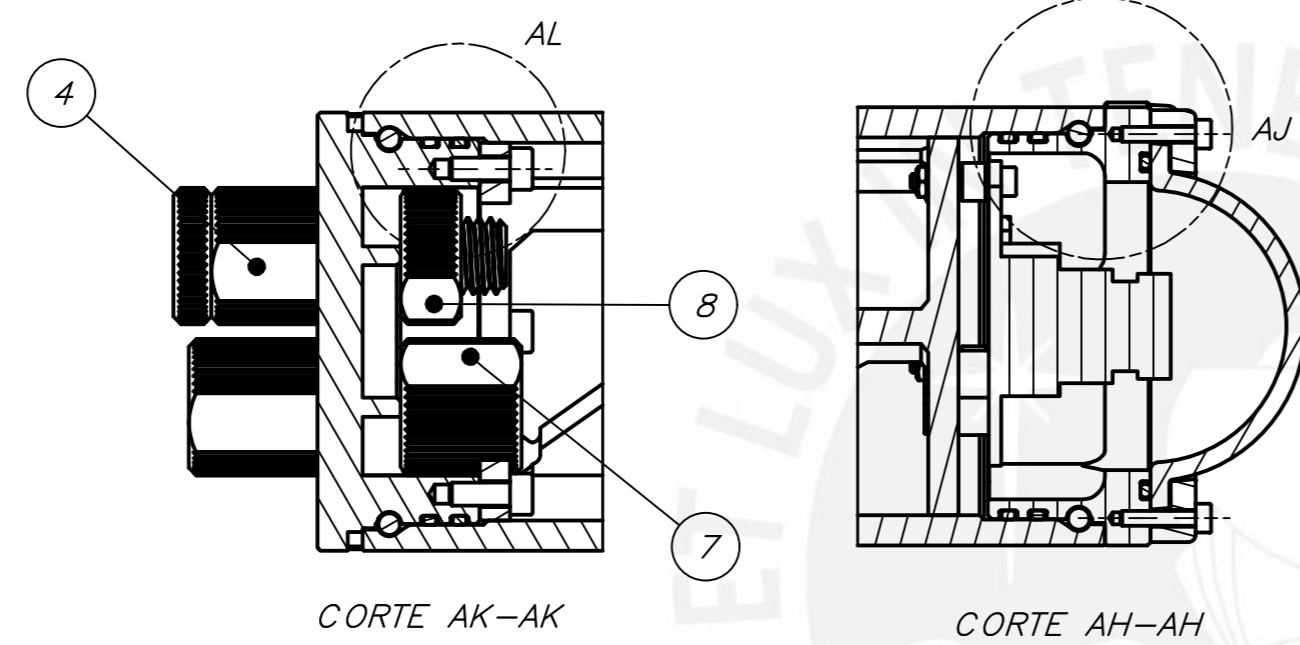
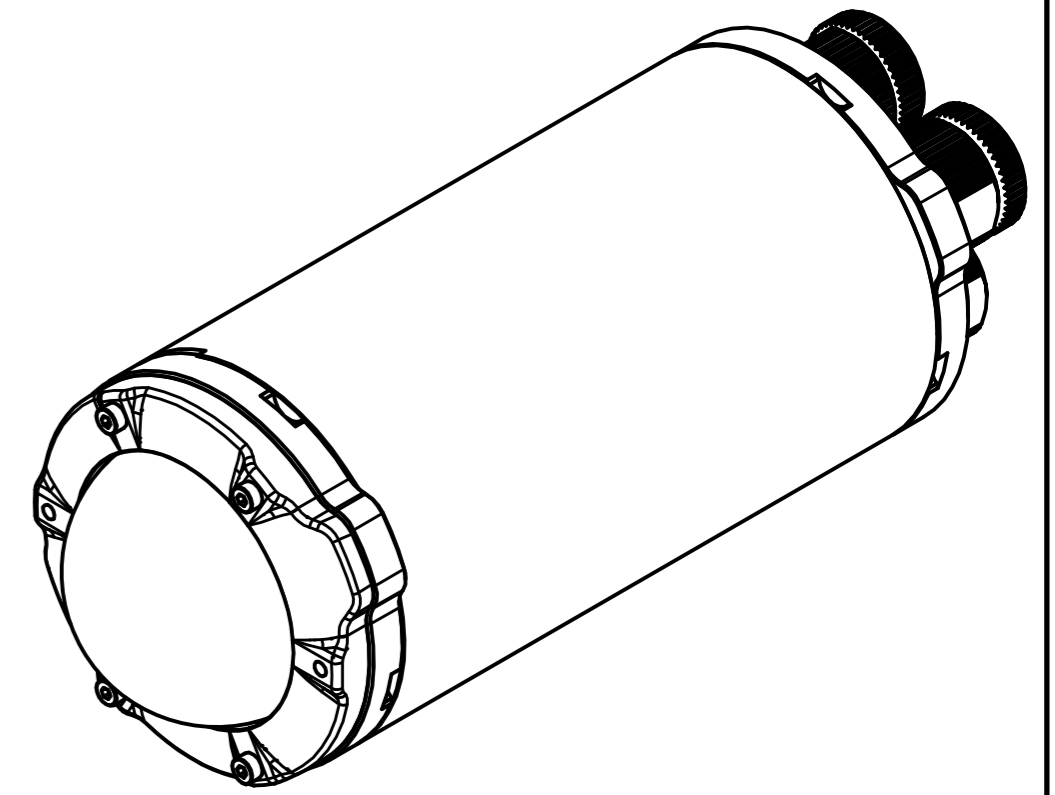
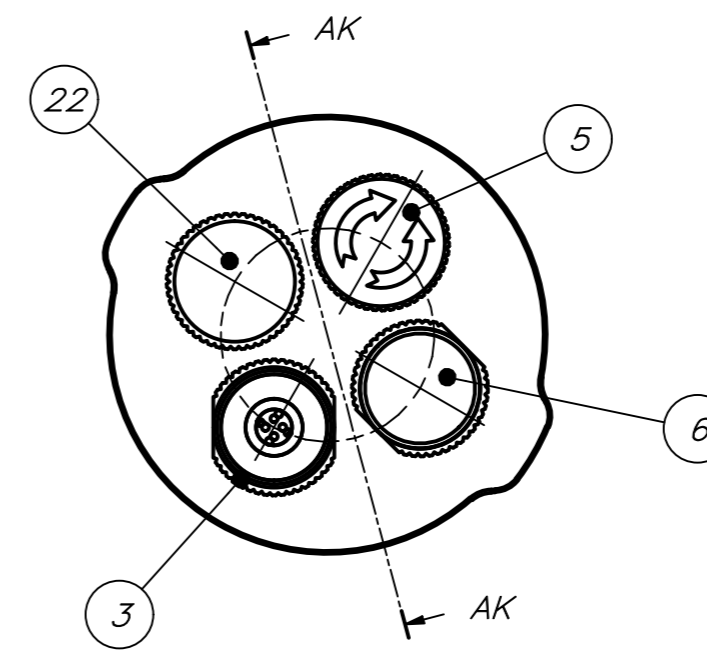
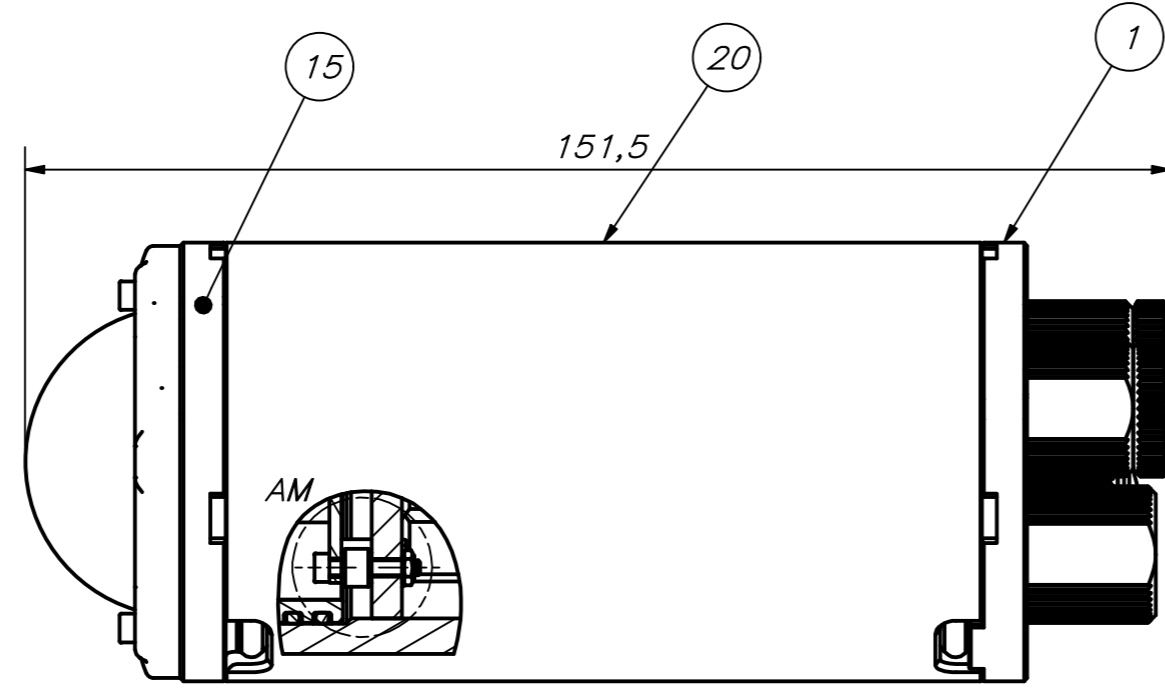
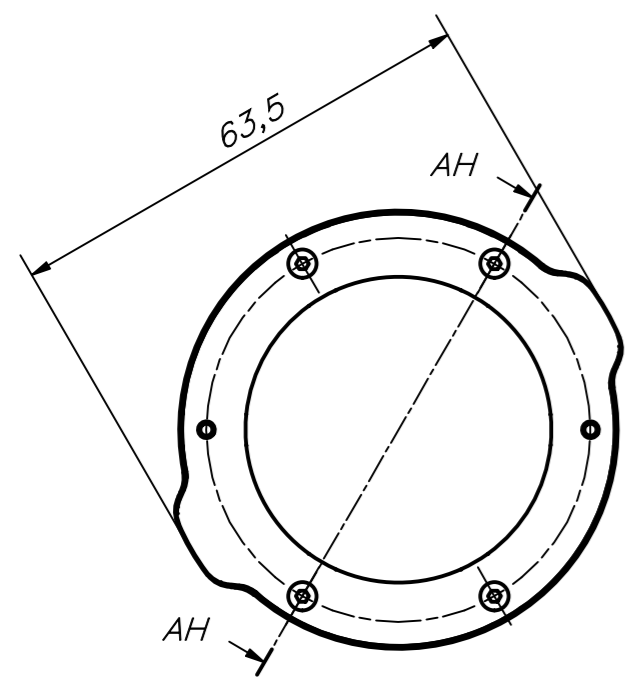
CORTE CW-CW



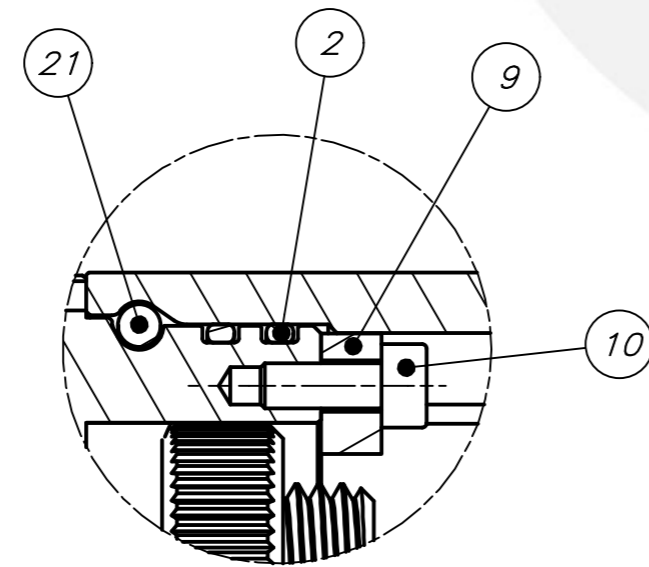
DETALLE DF
ESCALA 1 : 1

POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
26	4	CONECTOR A LUCES SUBMARINAS	-	-	INDIANO TECHNOLOGY - INC-3-F
25	8	TORNILLO ALLEN M3X16	ISO 4762	ASI 304	-
24	4	COMPLEMENTO SUJETADOR DE LUCES	-	COMPUESTO PLA-CFRP	05-001-A1
23	4	LUCES SUBMARINAS	-	-	INDIANO TECHNOLOGY - INC-401
22	2	SUJETADOR DE LUCES	-	COMPUESTO PLA-CFRP	05-001-A1
21	3	TORNILLO ALLEN M3X10	ISO 4762	ASI 304	-
20	1	SOP. SUP. TRASERO DE ENC. PRINCIPAL	-	COMPUESTO PLA-CFRP	05-004-A1
19	1	SOP. SUP. DELANTERO DE ENC. PRINCIPAL	-	COMPUESTO PLA-CFRP	05-003-A1
18	1	ENCLOSURE PRINCIPAL - 750m	-	-	05-004-A1
17	2	SOP. INF. DE ENC. PRINCIPAL	-	COMPUESTO PLA-CFRP	04-011-A1
16	2	ACOPLE UNIVERSAL	-	AA5081-16	05-005-A1
15	20	TORNILLO ALLEN M3X16	ISO 4762	ASI 304	-
14	1	ENCLOSURE SECUNDARIO CENTRAL - 750m	-	-	05-002-A1
13	2	SOP. ENCLOSURE SECUNDARIO CENTRAL	-	COMPUESTO PLA-CFRP	04-003-A1
12	4	TORNILLO ALLEN M3X16	ISO 4762	ASI 304	-
11	2	ENCLOSURE SECUNDARIO LATERAL	-	-	05-001-A1
10	34	TUERCA HEXAGONAL M3	ISO 4032	ASI 304	-
9	21	TORNILLO ALLEN M3X12	ISO 4762	ASI 304	-
8	4	SOP. ENCLOSURE SECUNDARIO LATERAL	-	COMPUESTO PLA-CFRP	04-002-A1
7	19	TORNILLO DE BAJA PERFIL M3X10	-	ACERO AL CARBONO	-
6	1	CUBIERTA DELANTERA	-	COMPUESTO PLA-CFRP	04-010-A1
5	24	TORNILLO DE BAJA PERFIL M3X8	-	ACERO AL CARBONO	-
4	2	BASE DE SOPORTE IZQUIERDA	-	-	04-006-A1
3	2	BASE DE SOPORTE DERECHA	-	-	04-004-A1
2	43	T-NUT	-	AA6061	-
1	1	ESTRUCTURA DE SOPORTE	-	-	04-001-A1

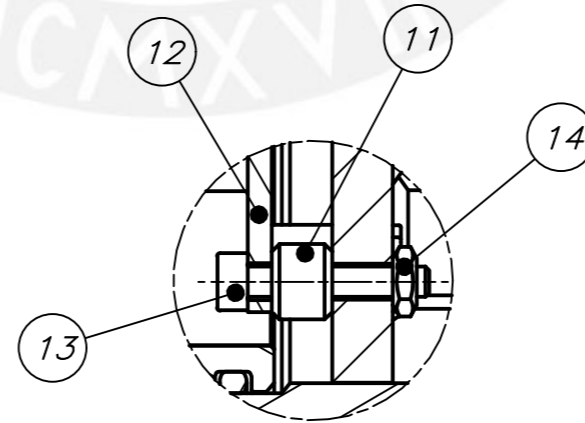
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA
SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TORRES VIRTUALES
ENSAMBLE GENERAL - 750m
ELABORADO POR: MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN
REVISADO POR: ARCE CIGÜERAS, DIEGO MARTÍN
FECHA: 2021.10.12
CÓDIGO: 60-E02-A0



DETALLE AJ
ESCALA 2 : 1



DETALLE AL
ESCALA 2 : 1



DETALLE AM
ESCALA 2 : 1

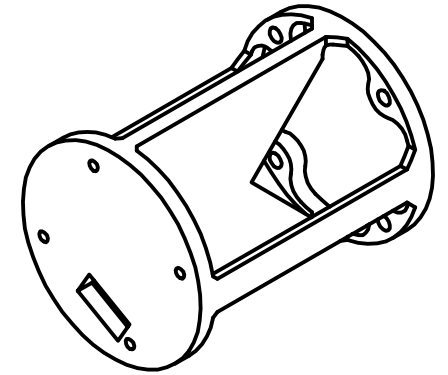
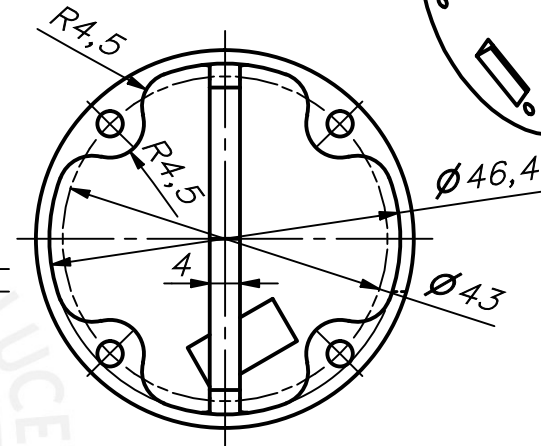
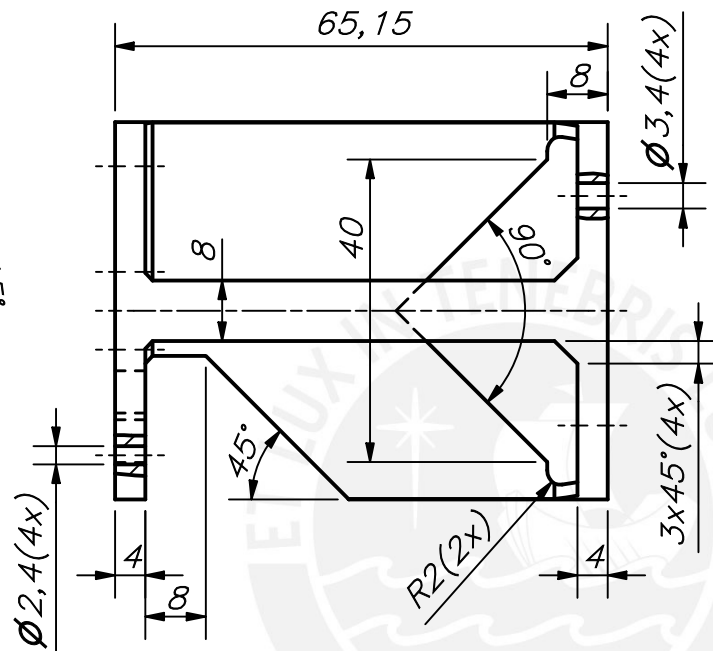
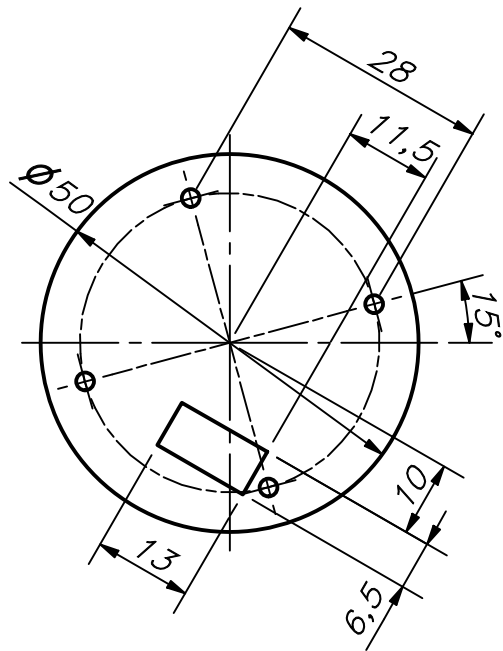
22	1	TAPÓN DE VENTILACIÓN	-	-	BLUERBOTICS - VENT PLUG
21	2	CORDON DE CIERRE	-	PTFE	BLUERBOTICS - PTFE LOCKING CORD WITH HANDLE
20	1	TUBO DE CIERRE DE 2"	-	AA6061-T6	BLUERBOTICS - ALUMINUM TUBE 100mm (2")
19	4	TORNILLO ALLEN M2X10	ISO 4762	AISI 304	-
18	1	RETENEDOR DE ANILLOS DE 2"	-	PC	BLUERBOTICS - FLANGE DOME CAP (2")
17	1	PUERTO DOMO DE 2"	-	ACRÍLICO	BLUERBOTICS - DOME OPTICALLY CLEAR ACRYLIC (2")
16	1	O-RIN AXIAL 030	AS568	NBR70	LUBRICADO CON GRASA DE SILICONA
15	1	BRIDA DE 2" PARA O-RING	-	AA6061-T6	BLUERBOTICS - O-RING FLANGES (2")
14	4	TUERCA HEXAGONAL M2	ISO 4032	AISI 304	-
13	4	TORNILLO ALLEN M2X16	ISO 4762	AISI 304	-
12	1	CÁMARA HD	-	-	BLUERBOTICS - LOW LIGHT HD USB CAMERA
11	4	SEPARADOR M2X4	-	COMPUESTO PLA-CFRP	-
10	3	TORNILLO ALLEN M3X8	ISO 4762	AISI 304	-
9	1	SOPORTE DE CÁMARA LATERAL	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G1-D01-A4
8	4	TUERCA M10X8	-	-	BLUERBOTICS - M10X8 PENETRATOR NUT
7	1	TUERCA M10X16	-	-	BLUERBOTICS - M10X16 PENETRATOR NUT
6	1	INDICADOR SUBMARINO VERDE / AZUL	-	-	BLUERBOTICS - SUBSEA LED INDICATOR
5	1	SWITCH SUBMARINO	-	-	BLUERBOTICS - SWITCH
4	1	PENETRATOR PARA VÁLVULA DE ESCAPE	-	-	BLUERBOTICS - VENT BOLT
3	1	PENETRATOR PARA COMUNICACIÓN	-	-	BLUERBOTICS - PENETRATOR M BOLT 8mm
2	4	O-RING RADIAL 030	AS568	NBR70	LUBRICADO CON GRASA DE SILICONA
1	1	TAPA DE BRIDA DE 4 AGUEROS	-	AA6061-T6	BLUERBOTICS - ALUMINUM FLANGE CAP 4 HOLES (2")
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN: SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES
ENCLOSURE SECUNDARIO LATERAL
ESCALA: **1:1**

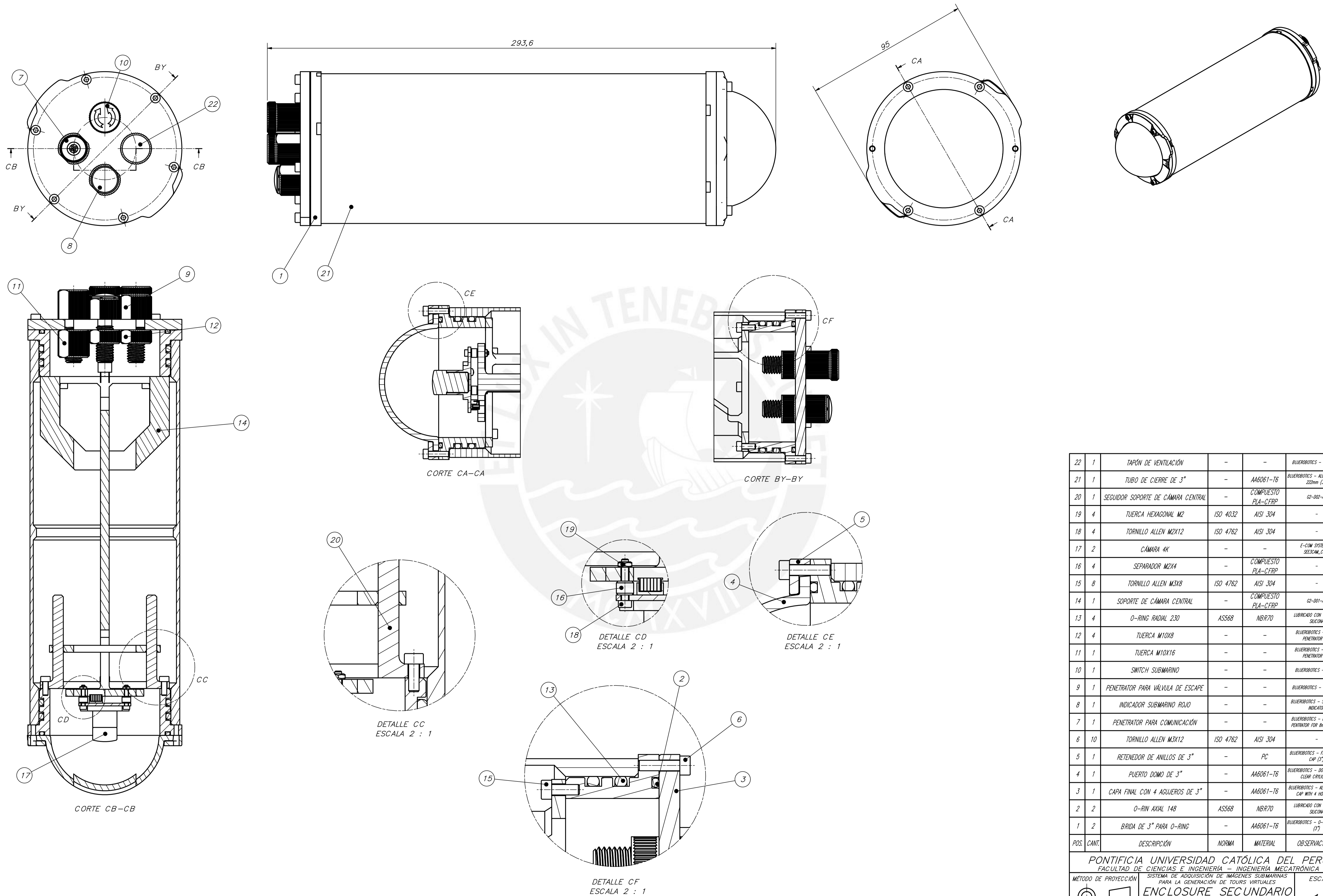
ELABORADO POR: MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN
FECHA: 2021.10.12

REVISADO POR: ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN
CÓDIGO: G1-E01-A2



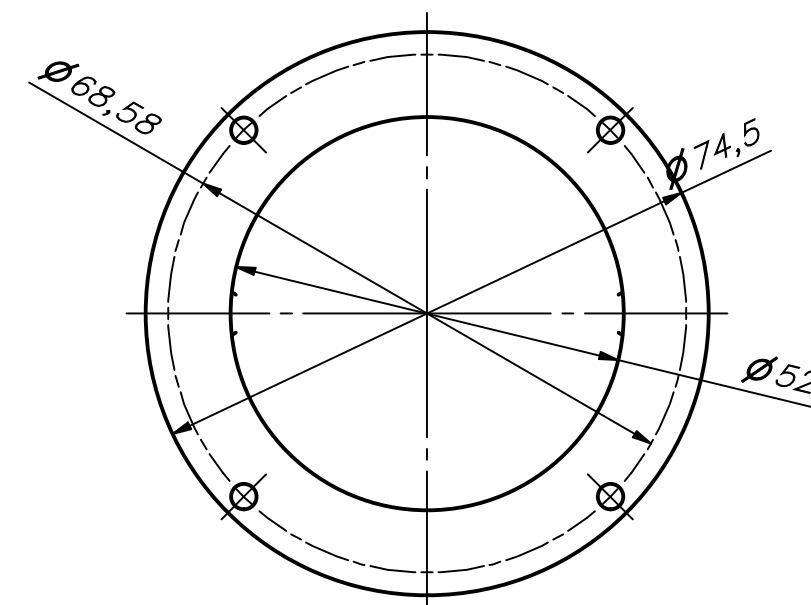
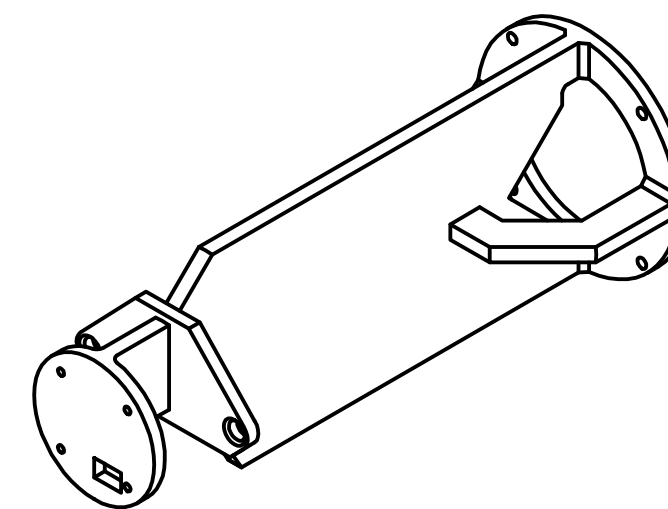
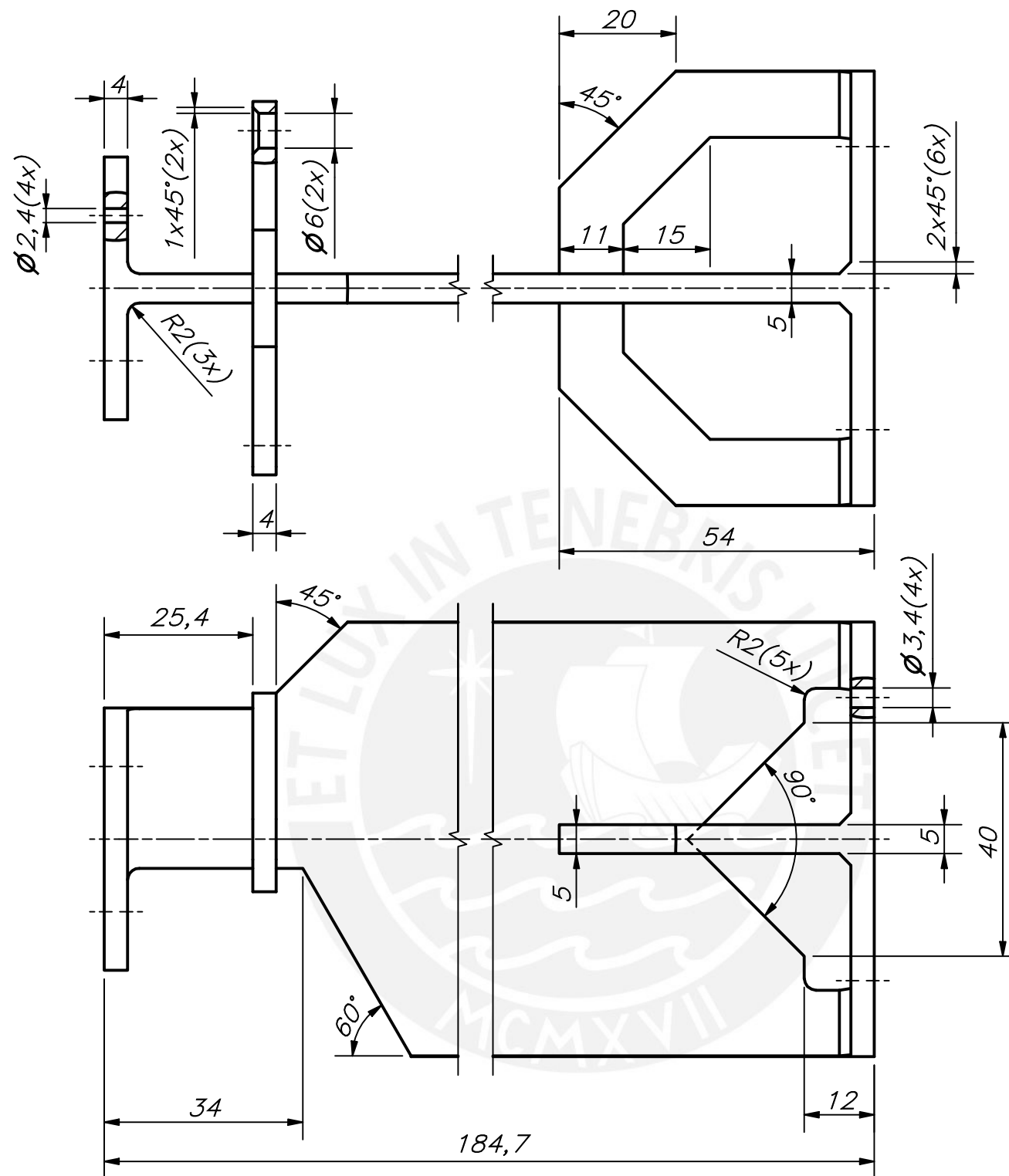
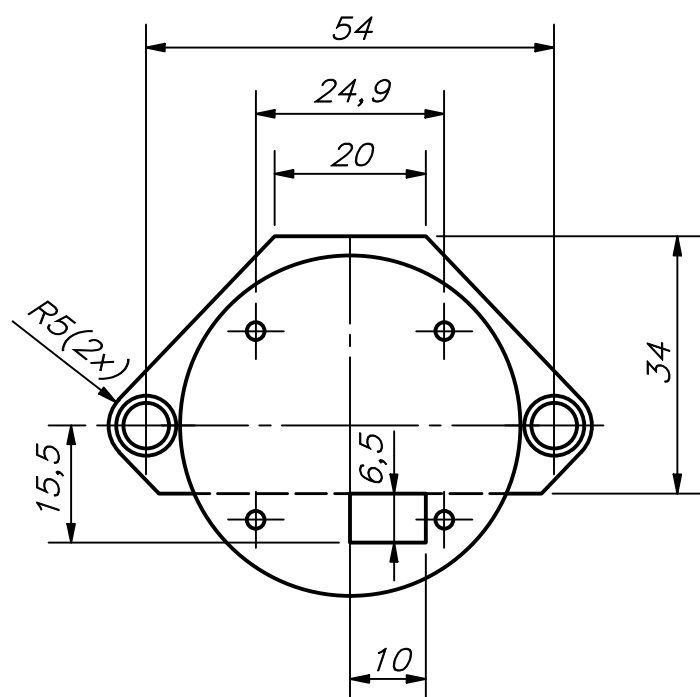
CHAFLANES NO INDICADOS 1x45°
IMPRESIÓN 3D

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES SOPORTE DE CÁMARA LATERAL	ESCALA 1:1
ELABORADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	LÁMINA: G1-D01-A4



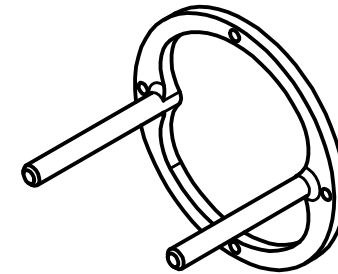
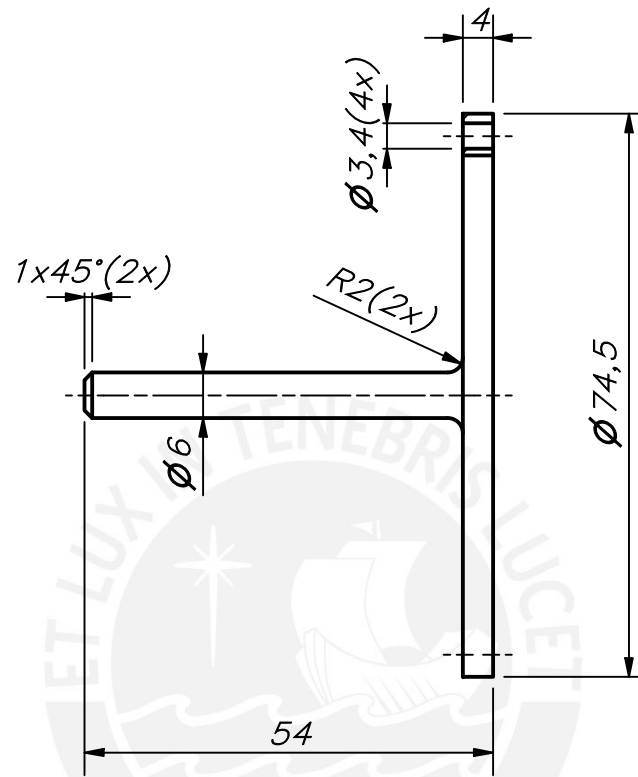
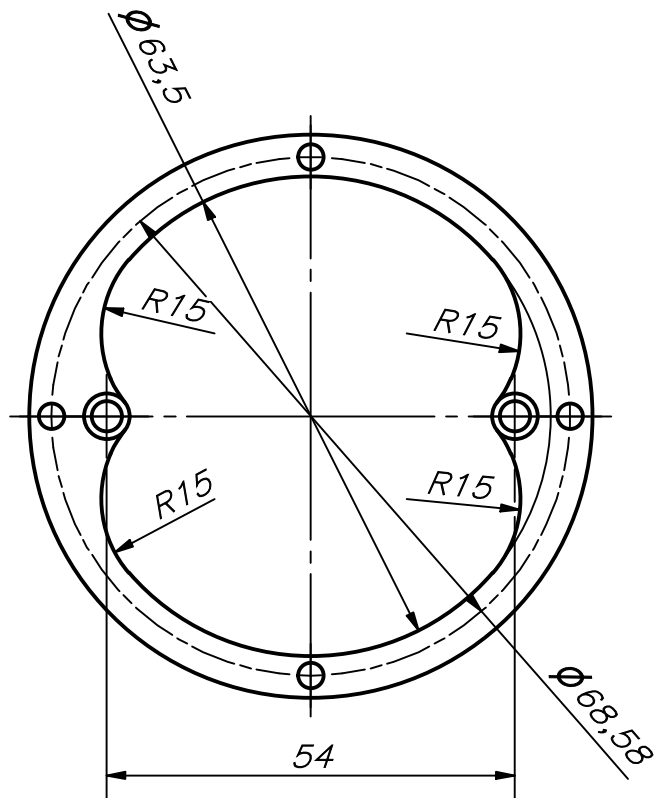
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
22	1	TAPÓN DE VENTILACIÓN	-	-	BLUERBOTICS - VENT PLUS
21	1	TUBO DE CIERRE DE 3"	-	AA6061-T6	BLUERBOTICS - ALUMINUM TUBE 22mm (I7)
20	1	SEGUIDOR SOPORTE DE CÁMARA CENTRAL	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G2-002-A4
19	4	TUERCA HEXAGONAL M2	ISO 4032	AISI 304	-
18	4	TORNILLO ALLEN M2X12	ISO 4762	AISI 304	-
17	2	CÁMARA 4K	-	-	E-COM SYSTEMS - SERIAL_CAM4K30
16	4	SEPARADOR M2X4	-	COMPUESTO PLA-CFRP	-
15	8	TORNILLO ALLEN M3X8	ISO 4762	AISI 304	-
14	1	SOPORTE DE CÁMARA CENTRAL	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G2-001-A3
13	4	O-RING RADIAL 230	AS568	NBR70	LUBRICADO CON GRASA DE SILICONA
12	4	TUERCA M10X8	-	-	BLUERBOTICS - M10X8 PENETRATOR NUT
11	1	TUERCA M10X16	-	-	BLUERBOTICS - M10X16 PENETRATOR NUT
10	1	SWITCH SUBMARINO	-	-	BLUERBOTICS - SWITCH
9	1	PENETRATOR PARA VÁLVULA DE ESCAPE	-	-	BLUERBOTICS - VENT BOLT
8	1	INDICADOR SUBMARINO ROJO	-	-	BLUERBOTICS - SUBSEA LED INDICATOR
7	1	PENETRATOR PARA COMUNICACIÓN	-	-	BLUERBOTICS - M10 CABLE PENETRATOR FOR 8mm CABLE
6	10	TORNILLO ALLEN M3X12	ISO 4762	AISI 304	-
5	1	RETENEDOR DE ANILLOS DE 3"	-	PC	BLUERBOTICS - FLANGE DOME CAP (I7)
4	1	PUERTO DOMO DE 3"	-	AA6061-T6	BLUERBOTICS - DOME OPTICALLY CLEAR CHUCK (I7)
3	1	CAPA FINAL CON 4 AGUEROS DE 3"	-	AA6061-T6	BLUERBOTICS - ALUMINUM END CAP WITH 4 HOLES (I7)
2	2	O-RIN AXIAL 148	AS568	NBR70	LUBRICADO CON GRASA DE SILICONA
1	2	BRIDA DE 3" PARA O-RING	-	AA6061-T6	BLUERBOTICS - O-RING FLANGES (I7)

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ		
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES	ESCALA
	ENCLOSURE SECUNDARIO CENTRAL	1:1
ELABORADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G2-E01-A1



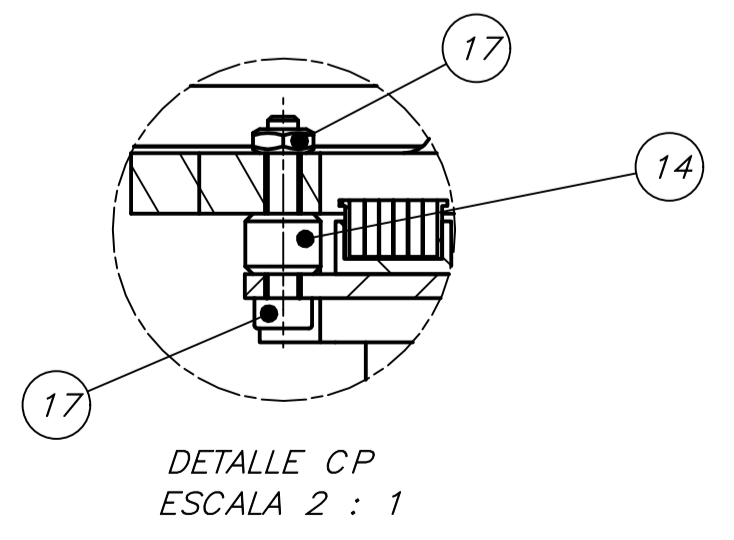
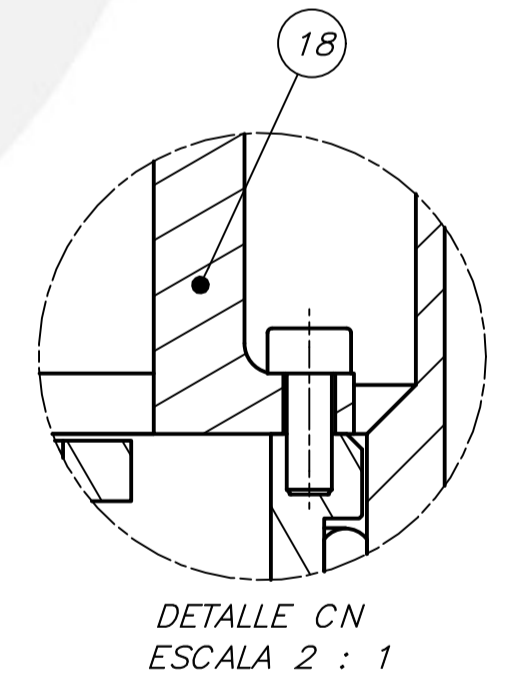
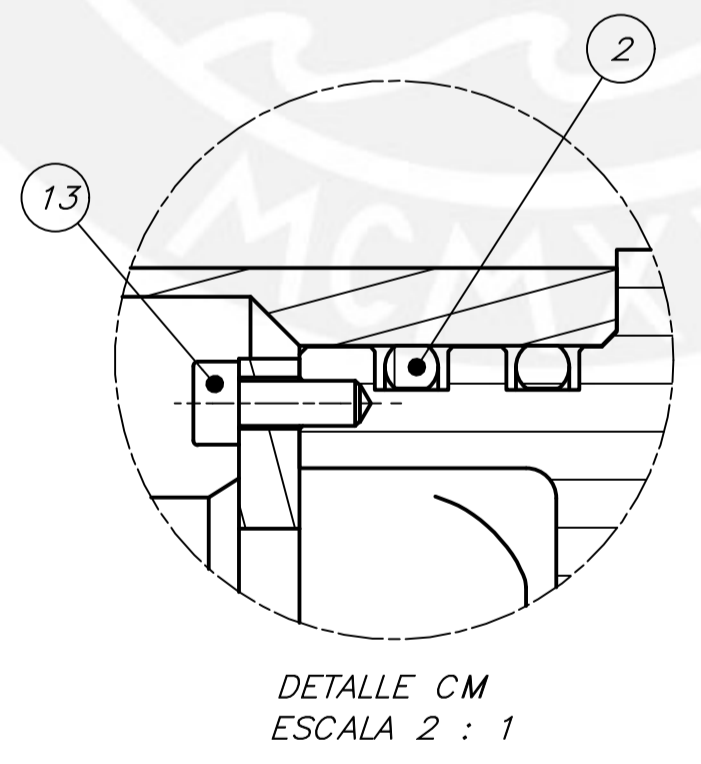
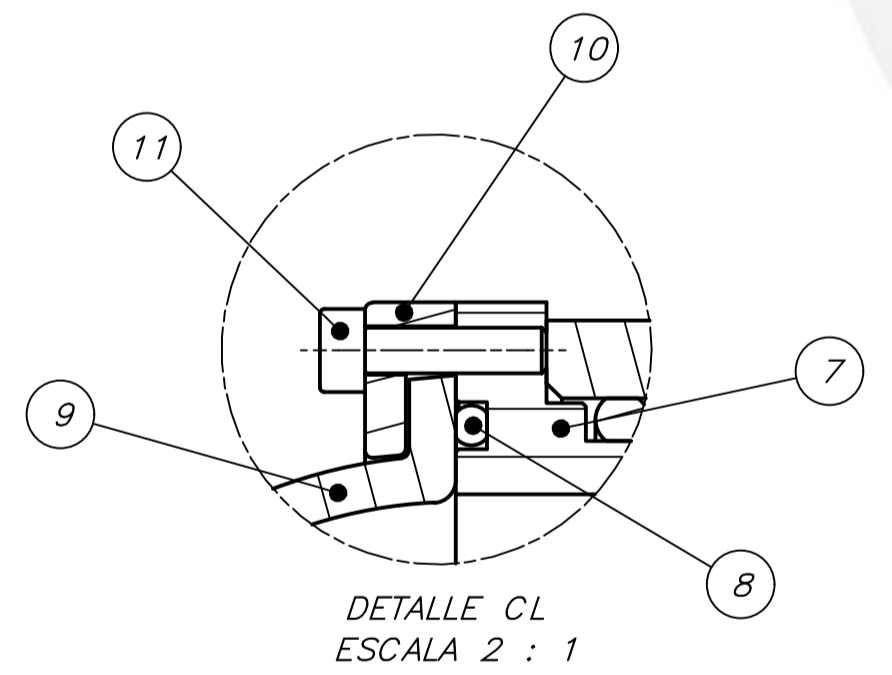
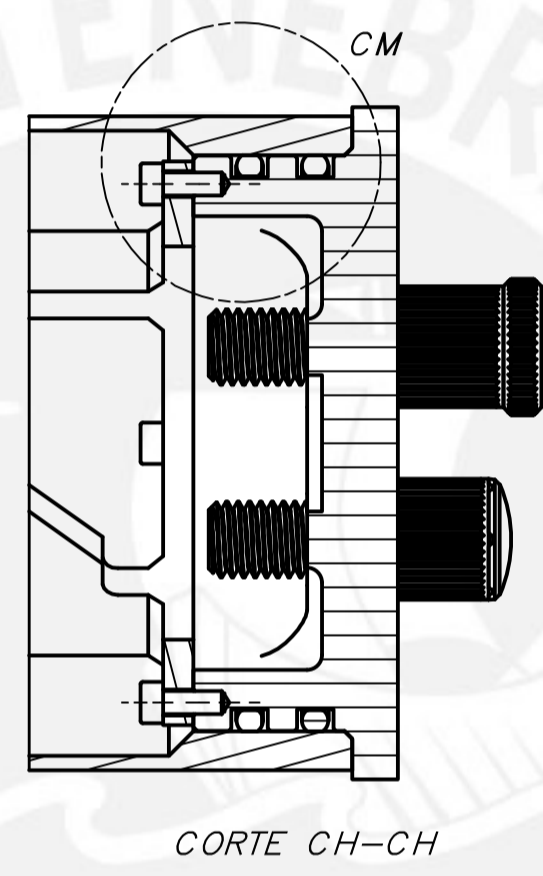
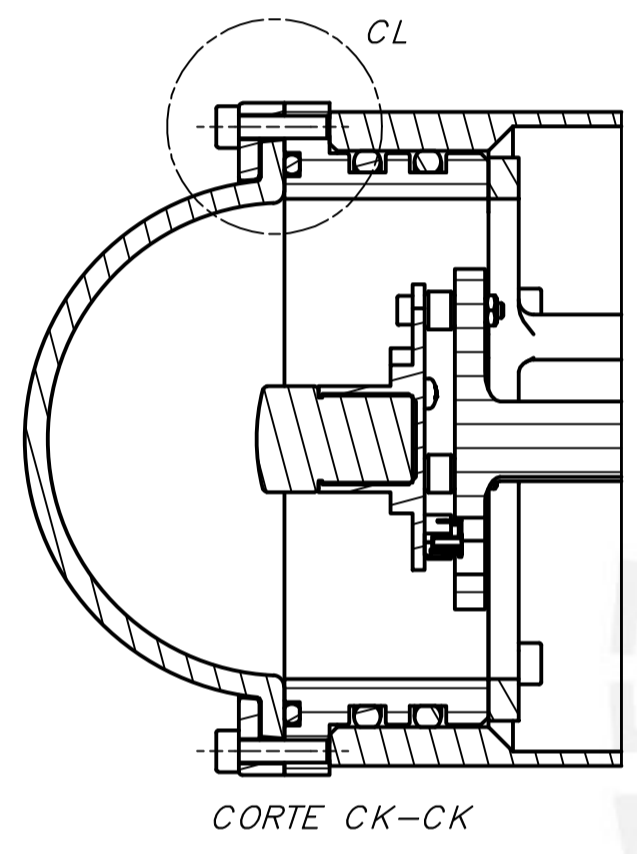
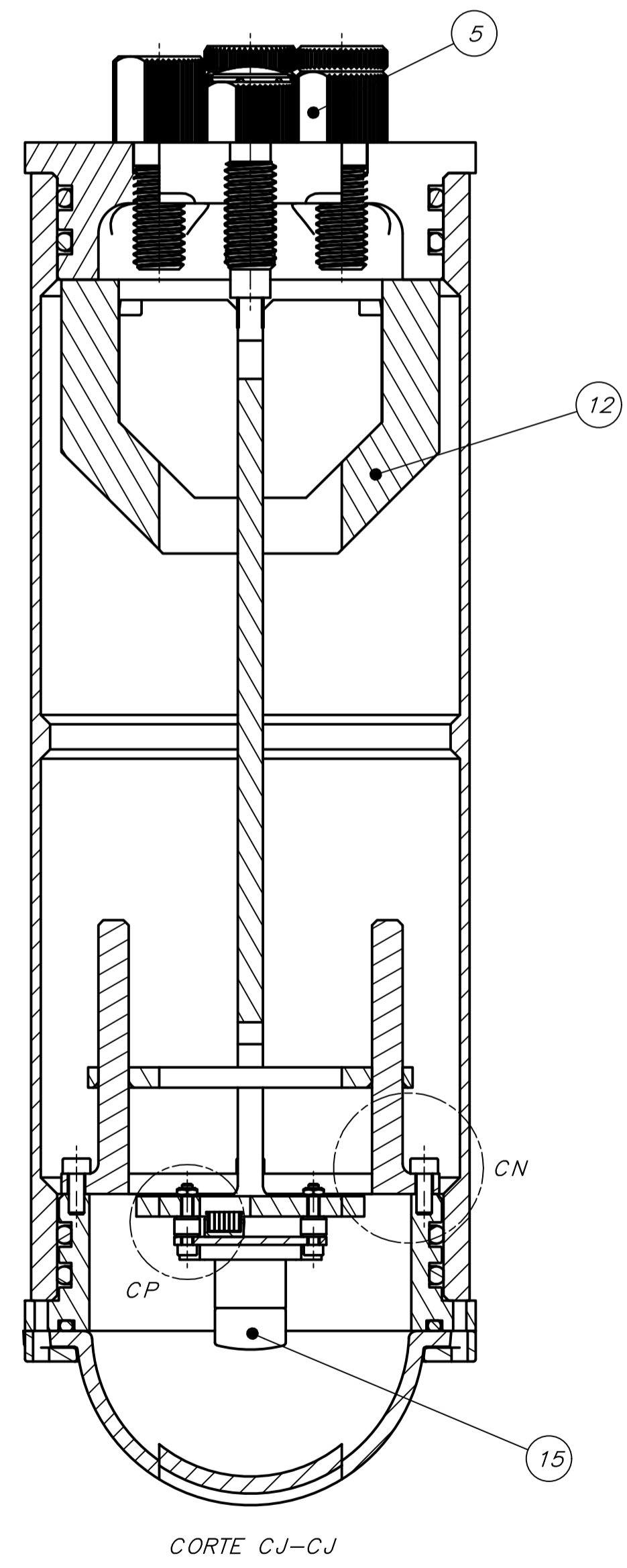
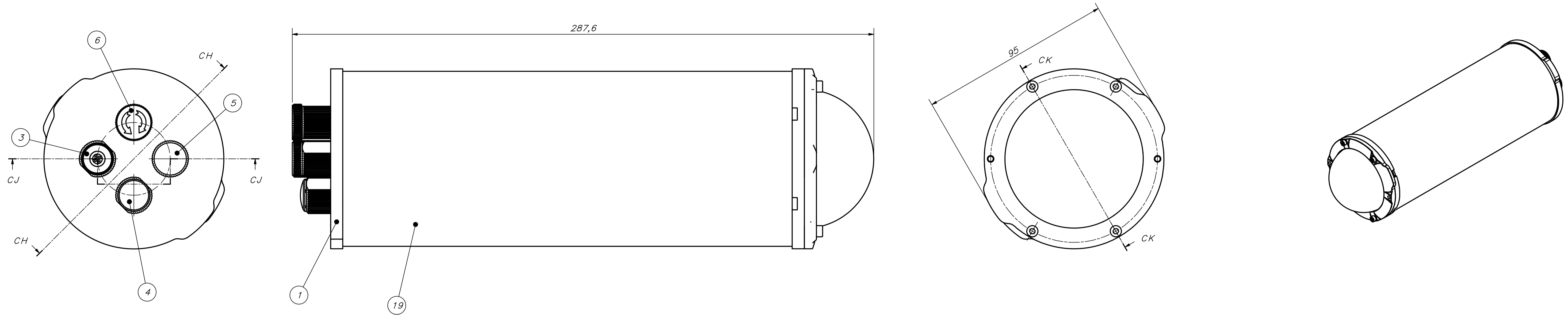
IMPRESIÓN 3D

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
<p>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA</p>		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES SOPORTE DE CÁMARA CENTRAL	ESCALA 1:1
ELABORADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G2-D01-A3



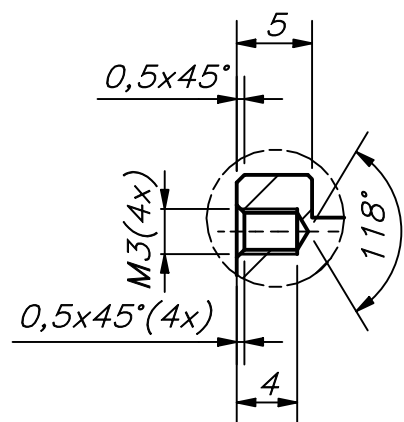
IMPRESIÓN 3D

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES SEGUIDOR DE CÁMARA CENTRAL	ESCALA 1:1
ELABORADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO G2-D02-A4

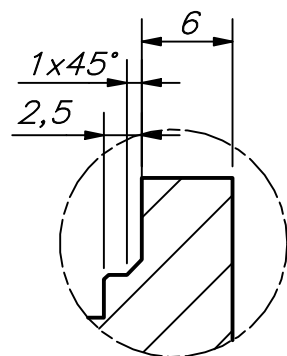


20	1	TAPÓN DE VENTILACIÓN	-	-	BLUERBOTICS - VENT PLUG
19	1	TUBO DE CIERRE DE 3"	-	AA6061-T6	BLUERBOTICS - ALUMINUM TUBE 222mm (3")
18	1	SEGUIDOR SOPORTE DE CÁMARA CENTRAL	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G2-002-A4
17	4	TUERCA HEXAGONAL M2	ISO 4032	AISI 304	-
16	4	TORNILLO ALLEN M2X12	ISO 4762	AISI 304	-
15	2	CÁMARA 4K	-	-	E-COM SYSTEMS - SECORAM_CURO
14	4	SEPARADOR M2X4	-	COMPUESTO PLA-CFRP	-
13	8	TORNILLO ALLEN M3X8	ISO 4762	AISI 304	-
12	1	SOPORTE DE CÁMARA CENTRAL	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G2-001-A3
11	4	TORNILLO ALLEN M3X12	ISO 4762	AISI 304	-
10	1	RETENEDOR DE ANILLOS DE 3"	-	PC	BLUERBOTICS - FLANGE DOME CAP (3")
9	1	PUERTO DOMO DE 3"	-	AA6061-T6	BLUERBOTICS - DOME OPTICALLY CLEAR CRUUC (3")
8	1	O-RIN AXIAL 148	AS568	NBR70	LUBRICADO CON GRASA DE SILICONA
7	1	BRIDA DE 3" PARA O-RING	-	AA6061-T6	BLUERBOTICS - O-RING FLANGES (3")
6	1	SWITCH SUBMARINO	-	-	BLUERBOTICS - SWITCH
5	1	PENETRADOR PARA VÁLVULA DE ESCAPE	-	-	BLUERBOTICS - VENT BOLT
4	1	INDICADOR SUBMARINO	-	-	BLUERBOTICS - SUBSEA LED INDICATOR
3	1	PENETRADOR PARA COMUNICACIÓN	-	-	BLUERBOTICS - MW CABLE PENETRATOR FOR 8mm CABLE
2	4	O-RING RADIAL 232	AS568	NBR70	LUBRICADO CON GRASA DE SILICONA
1	1	SELLO LATERAL DE 3" PARA PENETRATORS	-	AA6061-T6	G2-003-A3
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

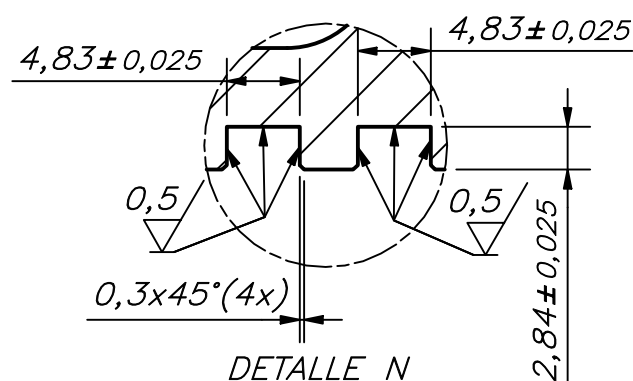
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES	ESCALA
	ENCLOSURE SECUNDARIO CENTRAL - 750m	1:1
ELABORADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G2-E02-A1



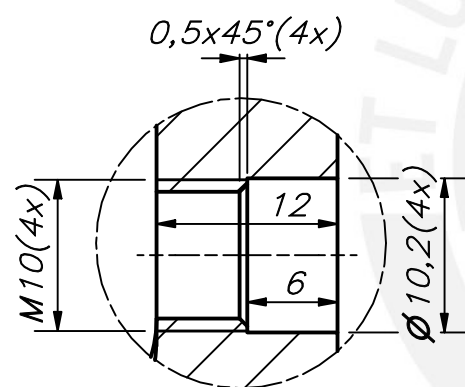
DETALLE M
ESCALA 2 : 1



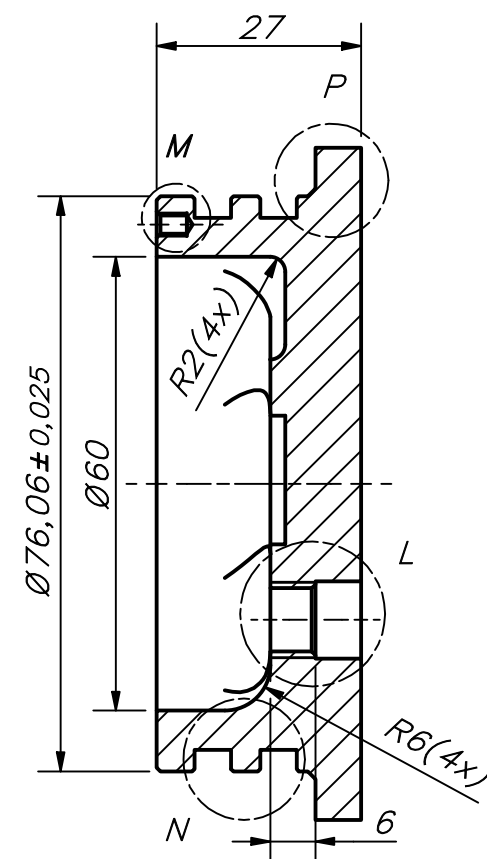
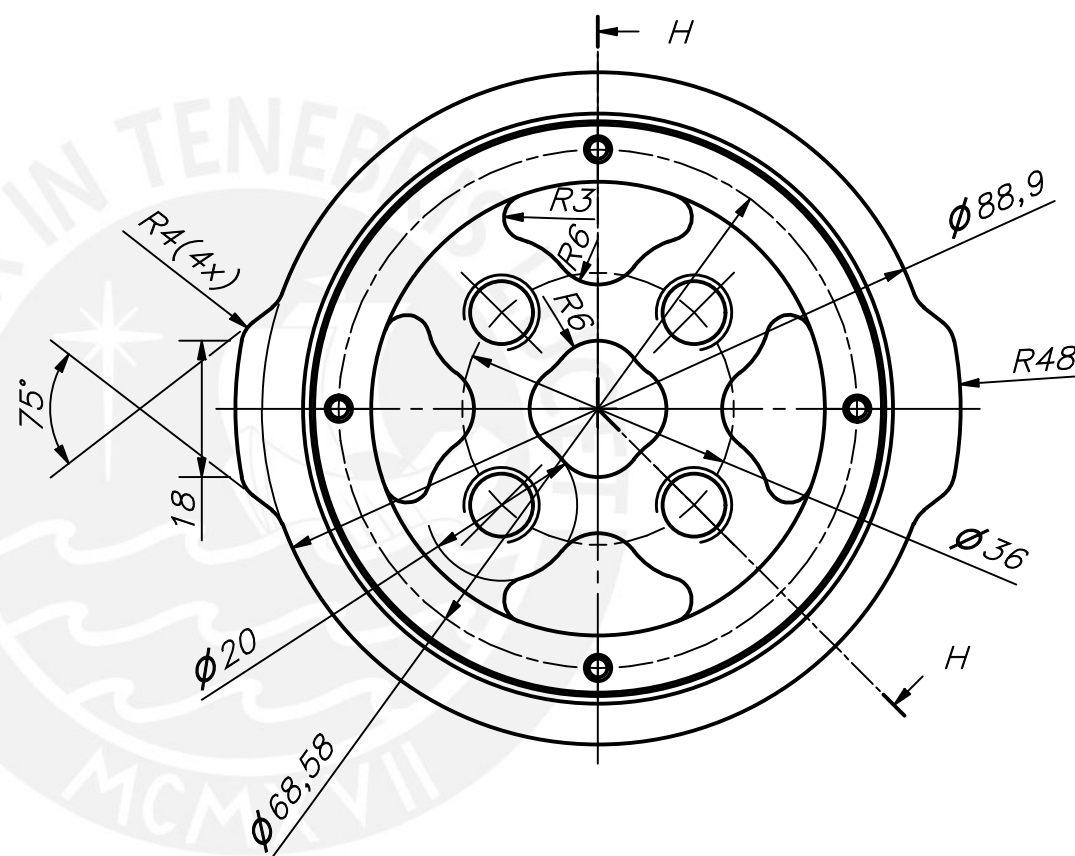
DETALLE P
ESCALA 2 : 1



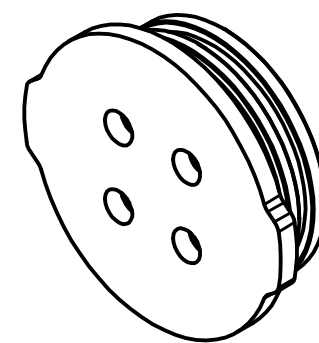
DETALLE N
ESCALA 2 : 1



DETALLE L
ESCALA 2 : 1



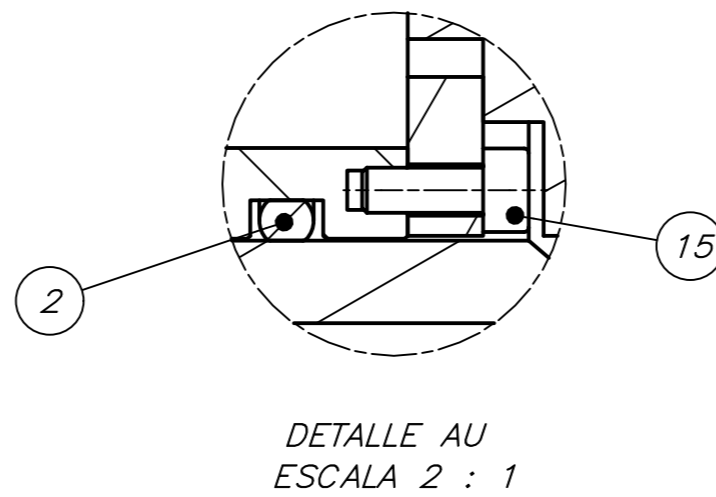
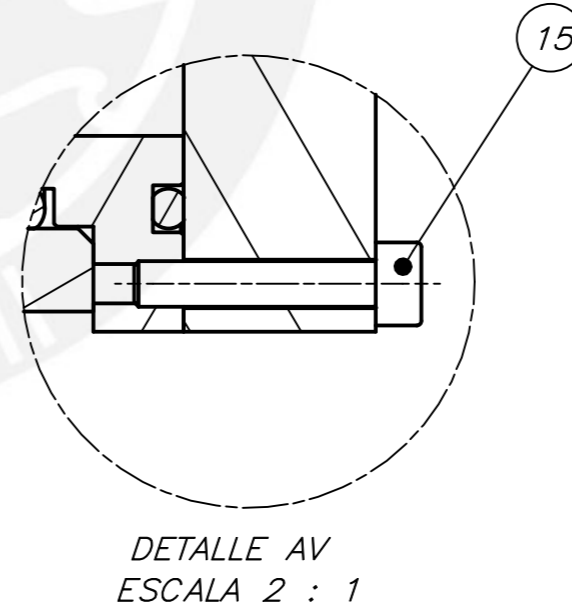
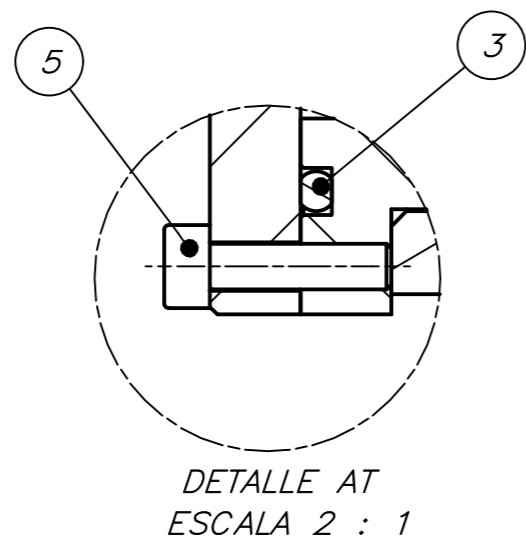
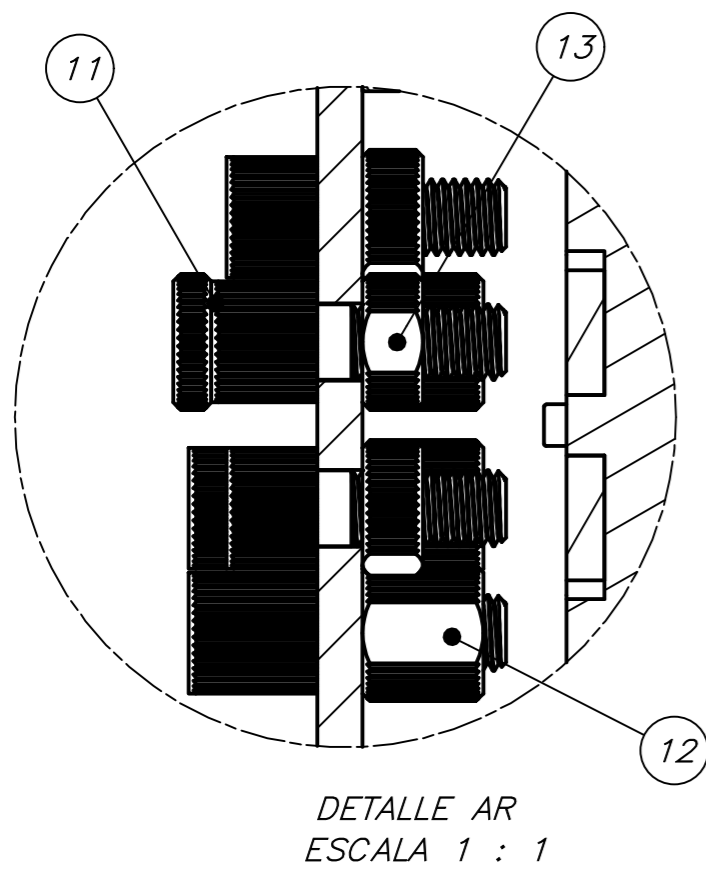
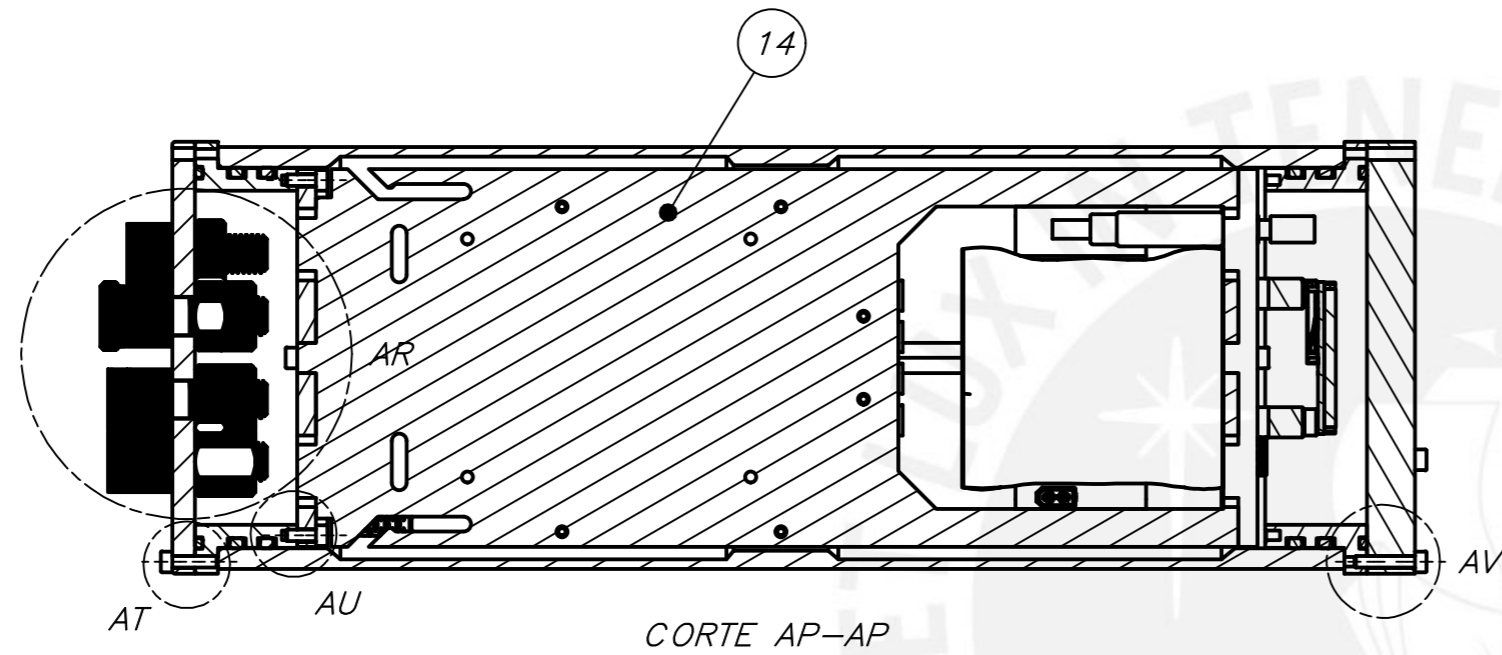
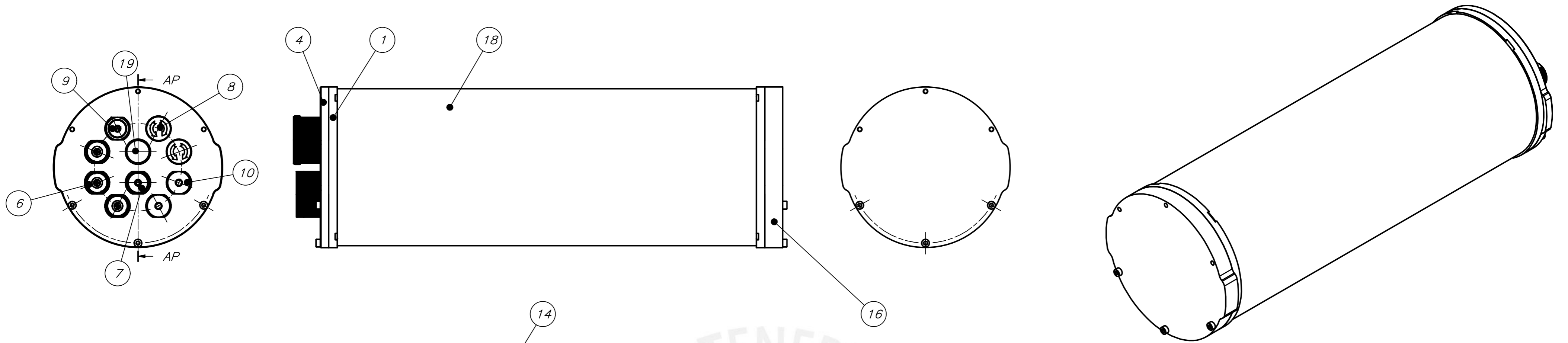
CORTE H-H



ACABADO SUPERFICIAL 3,2 / (0,5 /) ▽ (▽)	TOLERANCIA GENERAL * SEGÚN DIN ISO 2768-1 FINO	MATERIAL AA6061-T6
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES SELLO LATERAL DE 3” PARA PENETRATORS	ESCALA 1:1
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G2-D03-A3

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
FINO	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5

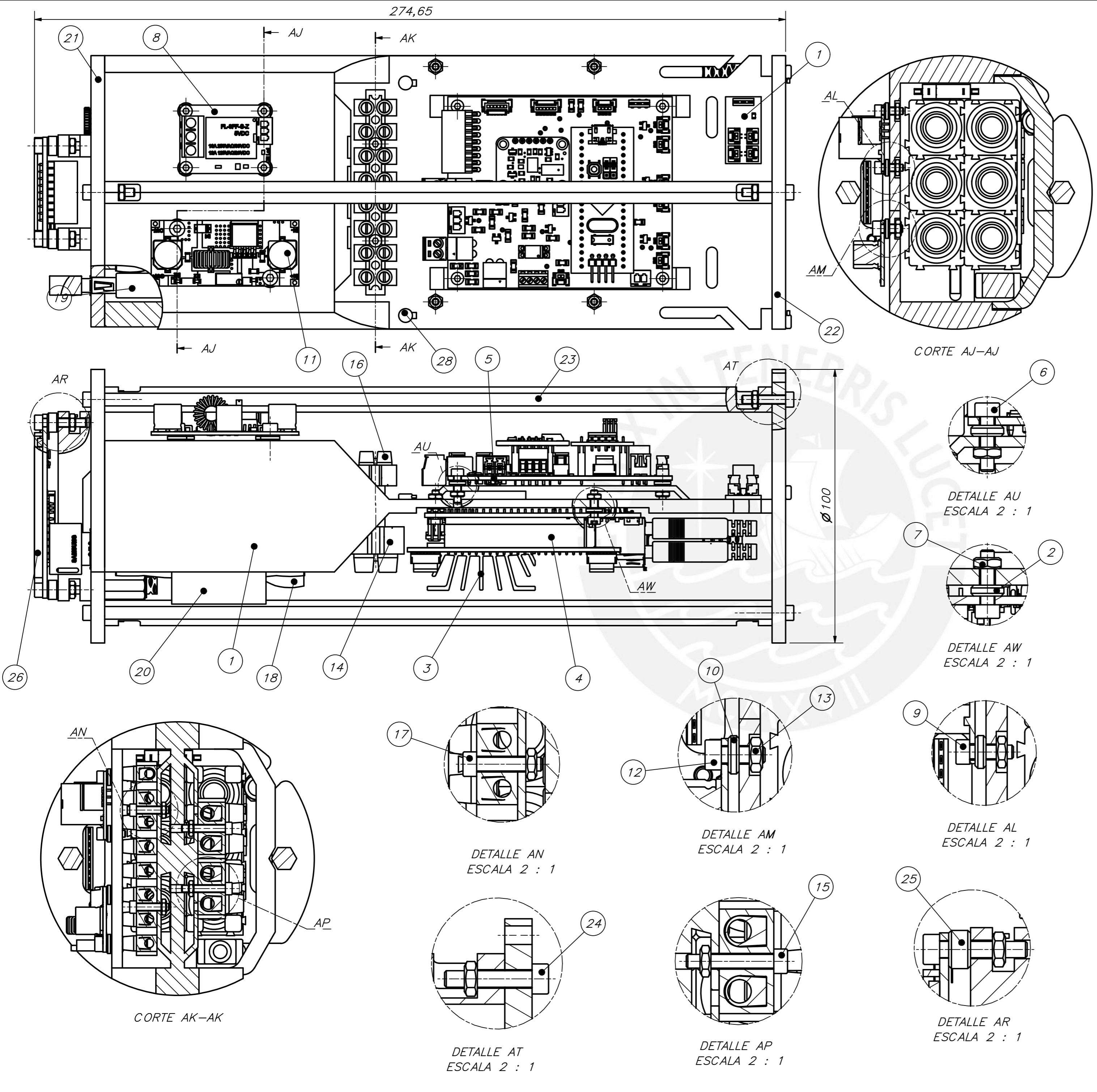


19	1	TAPÓN DE VENTILACIÓN	-	-	BLUERBOTICS - VENT PLUG
18	1	TUBO DE CIERRE DE 4"	-	AA6061-T6	BLUERBOTICS - ALUMINUM TUBE 298mm (3")
17	3	TORNILLO ALLEN M3X16	ISO 4762	AISI 304	-
16	1	CAPA FINAL CLARA DE 4"	-	ACRÍLICO	BLUERBOTICS - CLEAR ACRYLIC END CAP (4")
15	4	TORNILLO ALLEN M3X8	ISO 4762	AISI 304	-
14	1	SUBENSAMBLE DE BANDEJA	-	-	G3-E01-A2
13	7	TUERCA M10X8	-	-	BLUERBOTICS - M10X8 PENETRATOR NUT
12	3	TUERCA M10X16	-	-	BLUERBOTICS - M10X16 PENETRATOR NUT
11	1	PENETRATOR PARA VALVULA DE ESCAPE	-	-	BLUERBOTICS - VENT BOLT
10	2	PENETRATOR CERRADO	-	-	BLUERBOTICS - M10 CABLE PENETRATOR BLANK (NO HOLE)
9	1	PENETRATOR PARA LUCES SUBMARINAS	-	-	BLUERBOTICS - M10 CABLE PENETRATOR FOR 4-5mm CABLE
8	2	SWITCH SUBMARINO	-	-	BLUERBOTICS - SWITCH
7	1	SENSOR DE PRESIÓN	-	-	BLUERBOTICS - BAR30
6	3	PENETRATOR PARA COMUNICACIÓN	-	-	BLUERBOTICS - M10 CABLE PENETRATOR FOR 8mm CABLE
5	3	TORNILLO ALLEN M3X12	ISO 4762	AISI 304	-
4	1	CAPA FINAL CON 10 AGUEROS DE 4"	-	AA6061-T6	BLUERBOTICS - ALUMINUM END CAP WITH 10 HOLES (4")
3	2	O-RIN AXIAL 154	AS568	NBR70	LUBRICADO CON GRASA DE SILICONA
2	4	O-RING RADIAL 238	AS568	NBR70	LUBRICADO CON GRASA DE SILICONA
1	2	BRIDA DE 4" PARA O-RING	-	AA6061-T6	BLUERBOTICS - O-RING FLANGES (4")
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA

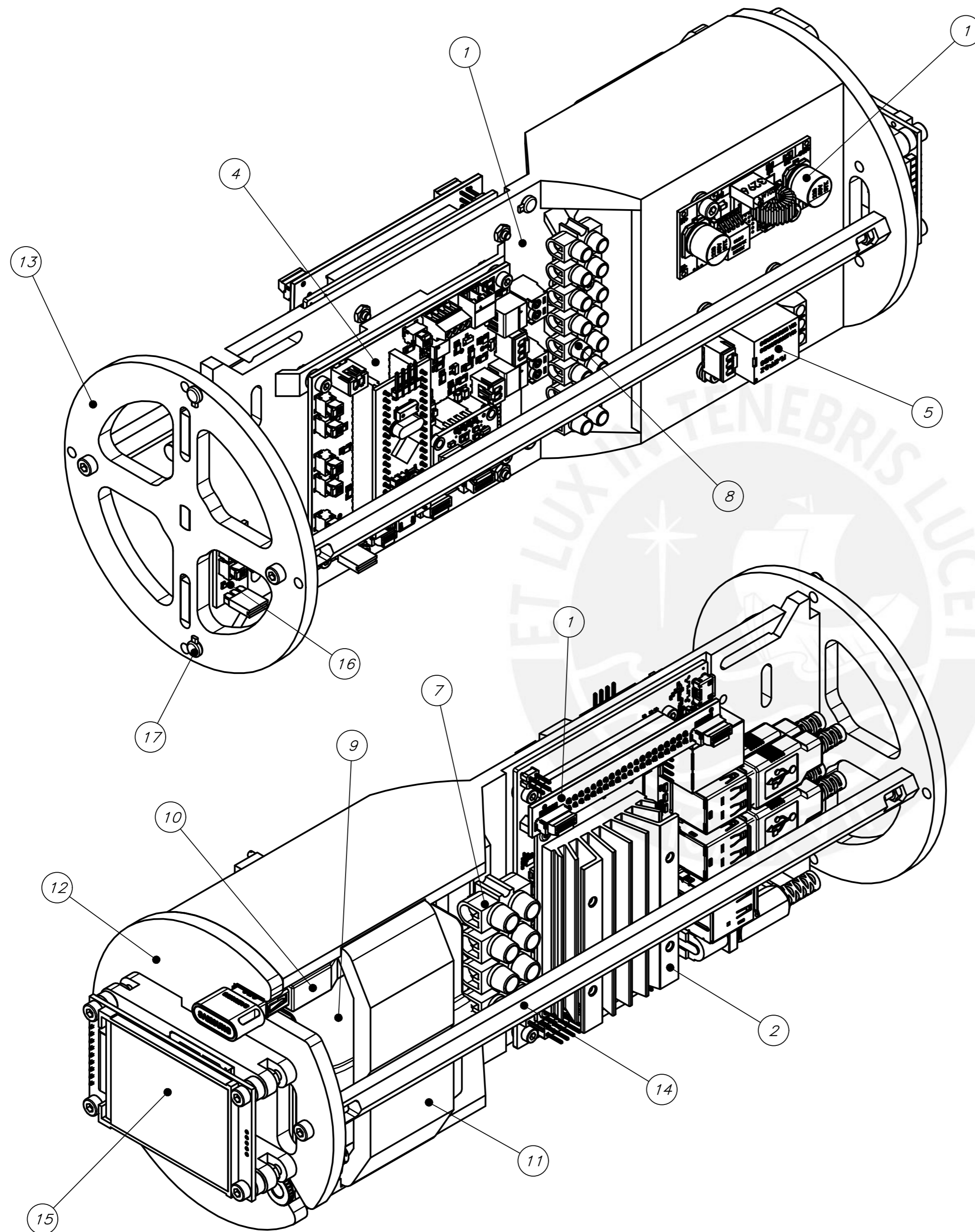
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES	ESCALA
		ENCLOSURE PRINCIPAL 1:2

ELABORADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G3-E01-A2



28	4	TIP SOS	-	-	BLUEROBOTICS - SOS PROBE TIP
27	1	SENSOR DE FUGA	-	-	BLUEROBOTICS - LEAK SENSOR
26	1	PANTALLA DE VISUALIZACIÓN	-	-	NAYLAMP - IUR341
25	4	SEPARADOR M3X4	-	COMPUESTO PLA-CFRP	-
24	8	TORNILLOS ALLEN M3X16	ISO 4762	AI SI 304	-
23	2	UNIÓN PARALELA	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G3-D03-A4
22	1	SOPORTE TRASERO DE BANDEJA	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G3-D02-A4
21	1	SOPORTE DELANTERO DE BANDEJA	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G3-D01-A4
20	1	SUJETADOR DE BATERÍA	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G3-D04-A4
19	1	PLUG USB-A	-	-	TECHSOLVERS - CABLE EXTENSION USB
18	1	BATERÍA	-	-	DOC ELECTRONIC PERU - BATERÍA 12.6V 3S
17	2	TORNILLOS ALLEN M2,5X12	ISO 4762	AI SI 304	-
16	1	BORNERA 5A 1X8	-	-	-
15	2	TORNILLOS ALLEN M2,5X16	ISO 4762	AI SI 304	-
14	1	BORNERA 10A 1X4	-	-	-
13	10	TUERCA HEXAGONAL M3	ISO 4032	AI SI 304	-
12	2	TORNILLOS ALLEN M3X8	ISO 4762	AI SI 304	-
11	1	REGULADOR A 5V	-	-	NAYLAMP - XL4015
10	2	SEPARADOR M3X2	-	COMPUESTO PLA-CFRP	-
9	4	TORNILLOS ALLEN M2,5X8	ISO 4762	AI SI 304	-
8	1	MÓDULO RELÉ	-	-	MASTERTRONIC - MÓDULO RELÉ 1 CANAL 5V
7	16	TUERCA HEXAGONAL M2,5	ISO 4032	AI SI 304	-
6	8	TORNILLOS ALLEN M2,5X10	ISO 4762	AI SI 304	-
5	1	PLACA DE CIRCUITO IMPRESO	-	-	E1-01-A4
4	1	SHIELD JETSON NANO	-	-	E1-02-A5
3	1	COMPUTADOR DE PLACA ÚNICA	-	-	AMAZON - JETSON NANO DEVELOPER KIT
2	12	SEPARADOR M2,5X2	-	COMPUESTO PLA-CFRP	-
1	1	BANDEJA DE COMPONENTES	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G3-D05-A3
POS. CANT.		DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

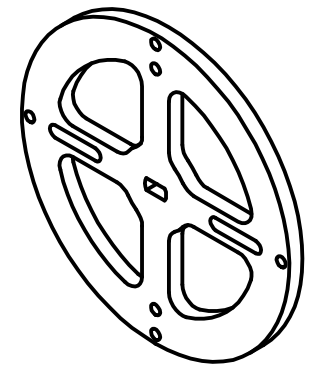
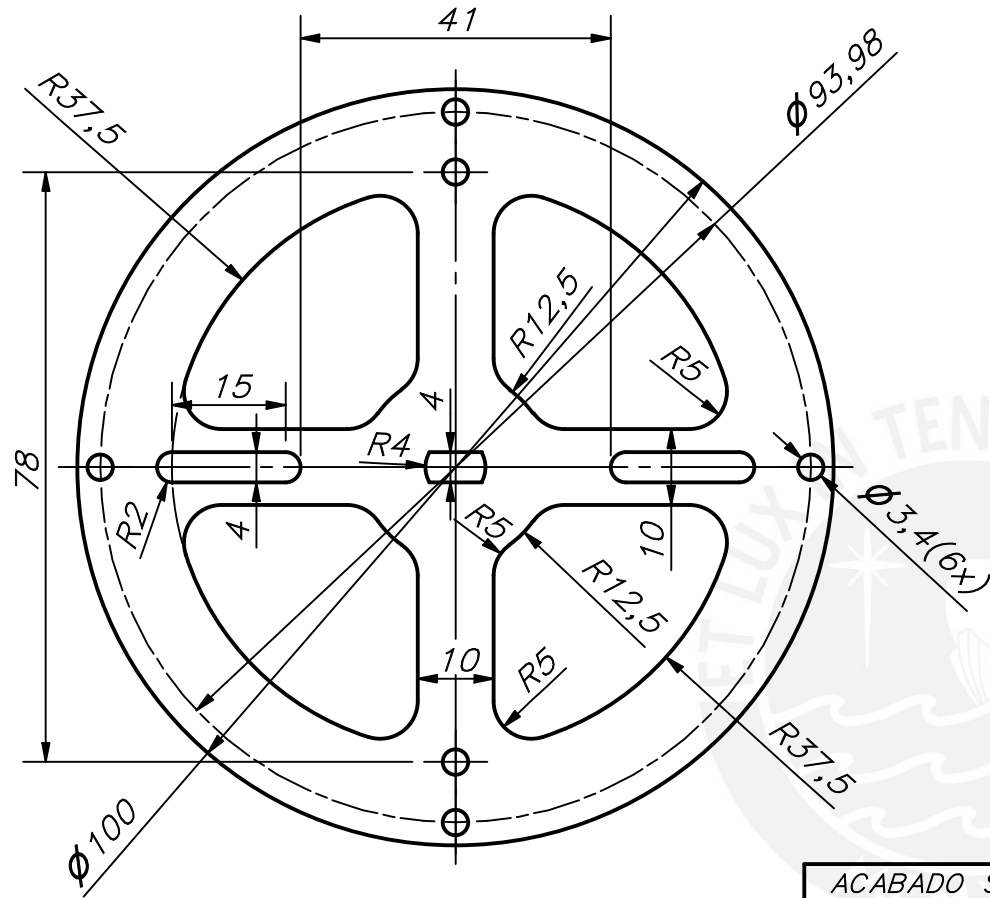
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES			
MÉTODO DE PROYECCIÓN			ESCALA
	SUBENSAMBLE DE BANDEJA		1:1
ELABORADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA:	2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO:	G3-E02-A2



17	4	TIP SOS	-	-	BLUERBOTICS - SOS PROBE TIP
16	1	SENSOR DE FUGA	-	-	BLUERBOTICS - LEAK SENSOR
15	1	PANTALLA DE VISUALIZACIÓN	-	-	NAYLAMP - I18341
14	2	UNIÓN PARALELA	-	COMPUUESTO PLA-CFRP	G3-D03-A4
13	1	SOPORTE TRASERO DE BANDEJA	-	COMPUUESTO PLA-CFRP	G3-D02-A4
12	1	SOPORTE DELANTERO DE BANDEJA	-	COMPUUESTO PLA-CFRP	G3-D01-A4
11	1	SUJETADOR DE BATERÍA	-	COMPUUESTO PLA-CFRP	G3-D04-A4
10	1	PLUG USB-A	-	-	TECHSOLVERS - CABLE EXTENSIÓN USB
9	1	BATERÍA	-	-	DOC ELECTRONIC PERU - BATERÍA 12.6V 3S
8	1	BORNERA 10A 1X4	-	-	-
7	1	BORNERA 5A 1X8	-	-	-
6	1	REGULADOR A 5V	-	-	NAYLAMP - XL4015
5	1	MÓDULO RELÉ	-	-	MASTERTRONIC - MÓDULO RELÉ 1 CANAL 5V
4	1	PLACA DE CIRCUITO IMPRESO	-	-	E1-01-A4
3	1	SHIELD JETSON NANO	-	-	E1-02-A5
2	1	COMPUTADOR DE PLACA ÚNICA	-	-	AMAZON - JETSON NANO DEVELOPER KIT
1	1	BANDEJA DE COMPONENTES	-	COMPUUESTO PLA-CFRP	G3-D05-A3
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

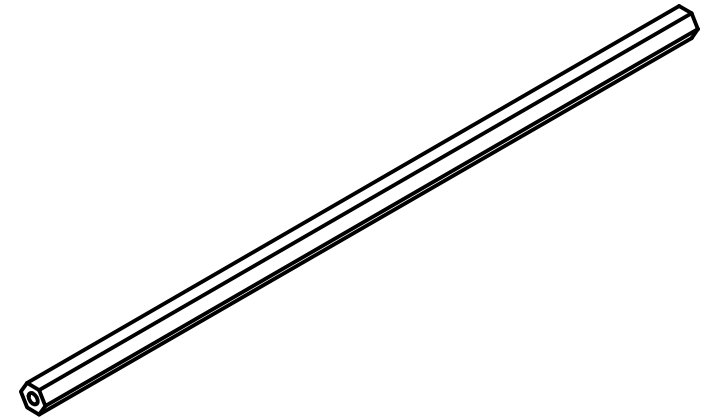
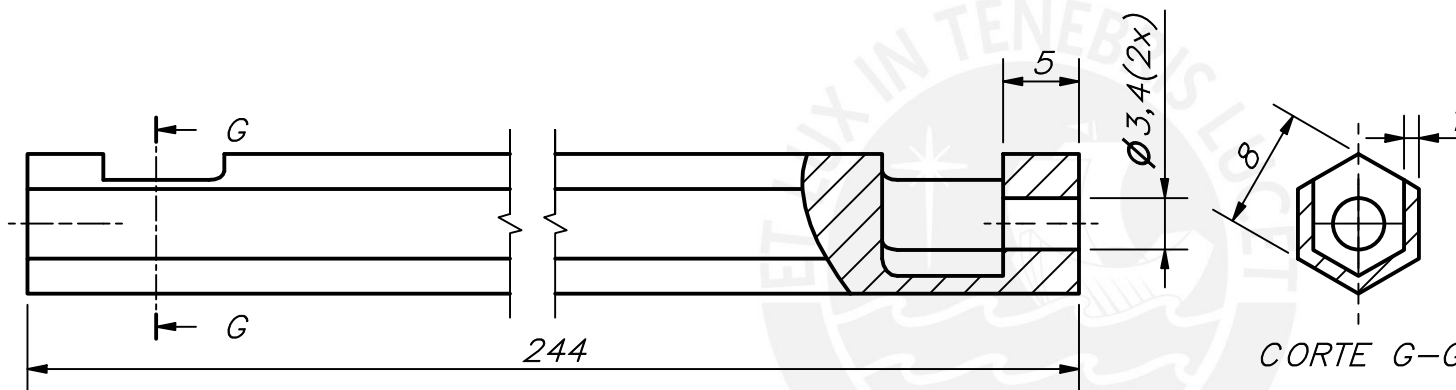
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES	ESCALA
	SUBENSAMBLE DE BANDEJA - ISO	1:1
ELABORADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G3-E02-A2



ESPEJOR 5mm
IMPRESIÓN 3D

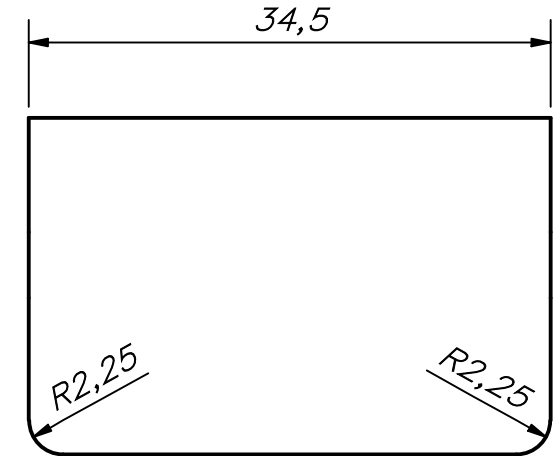
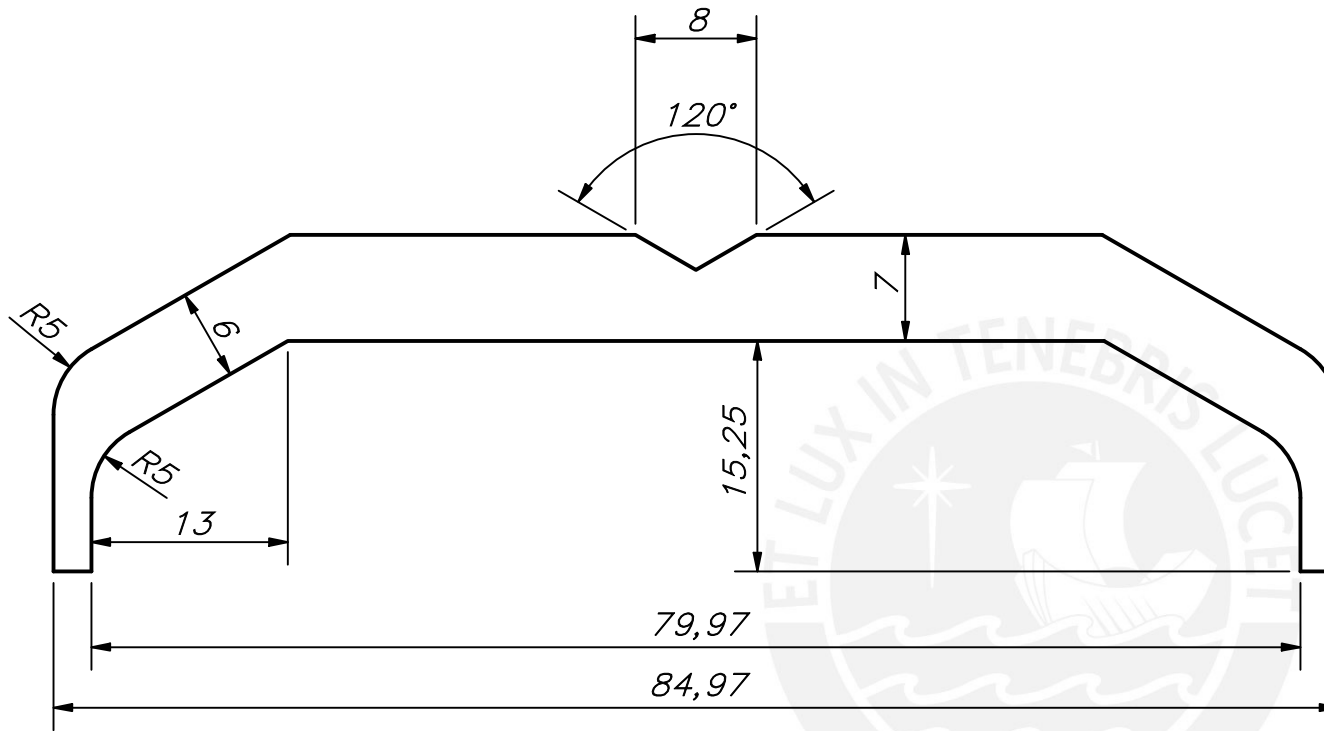
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES SOPORTE TRASERO DE BANDEJA	ESCALA 1:1
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G3-D02-A4



CORTE G-G REDONDEOS NO INDICADOS R1

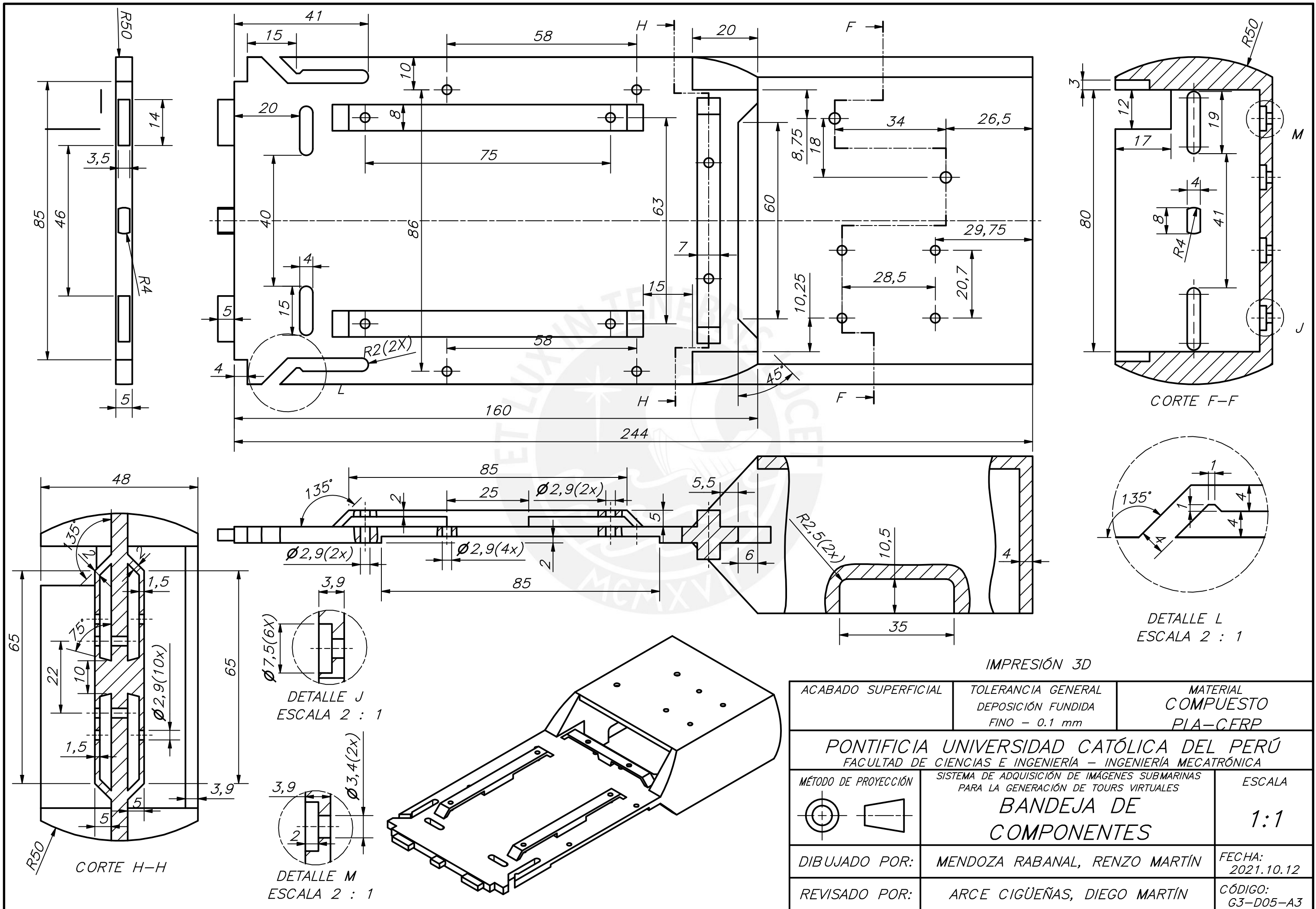
IMPRESIÓN 3D

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES	ESCALA
	UNIÓN PARALELA	2:1
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G3-D03-A4



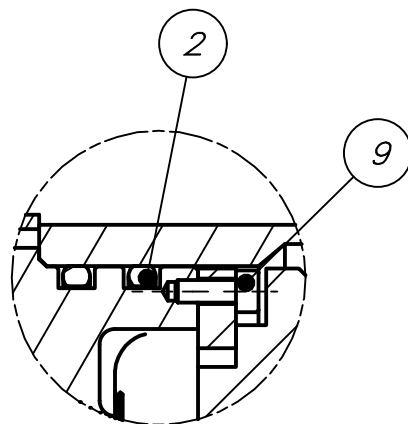
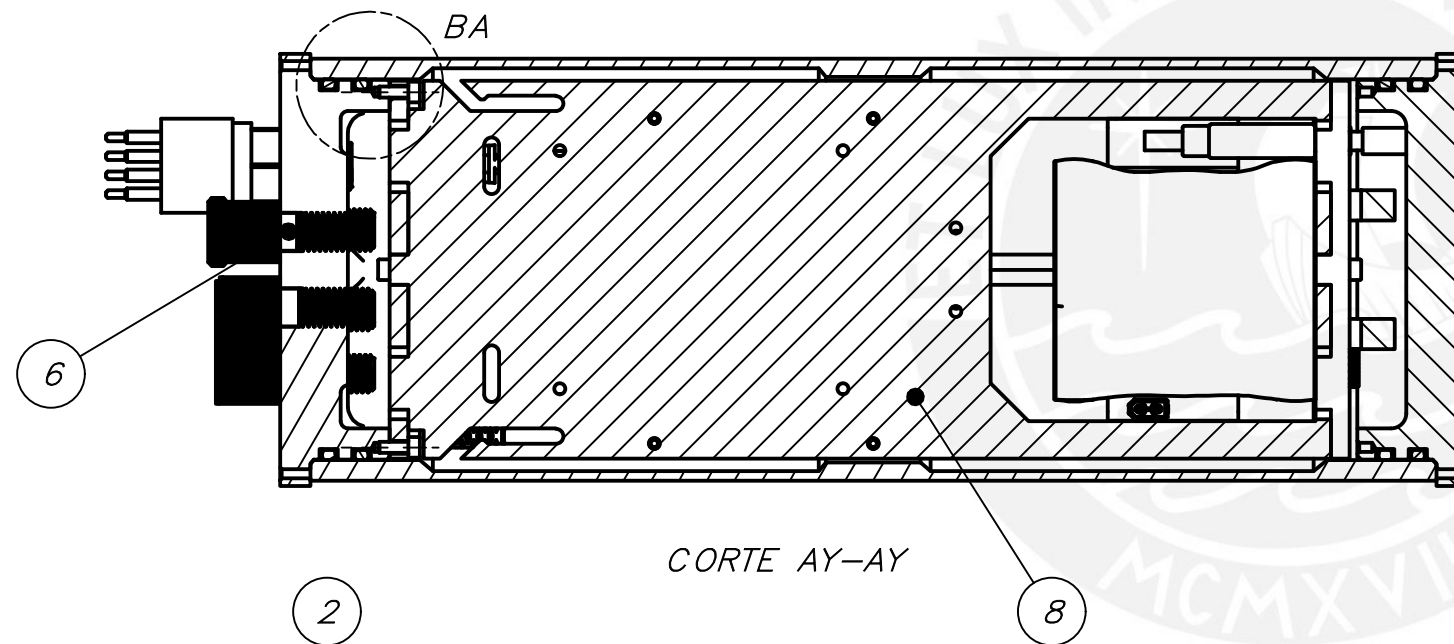
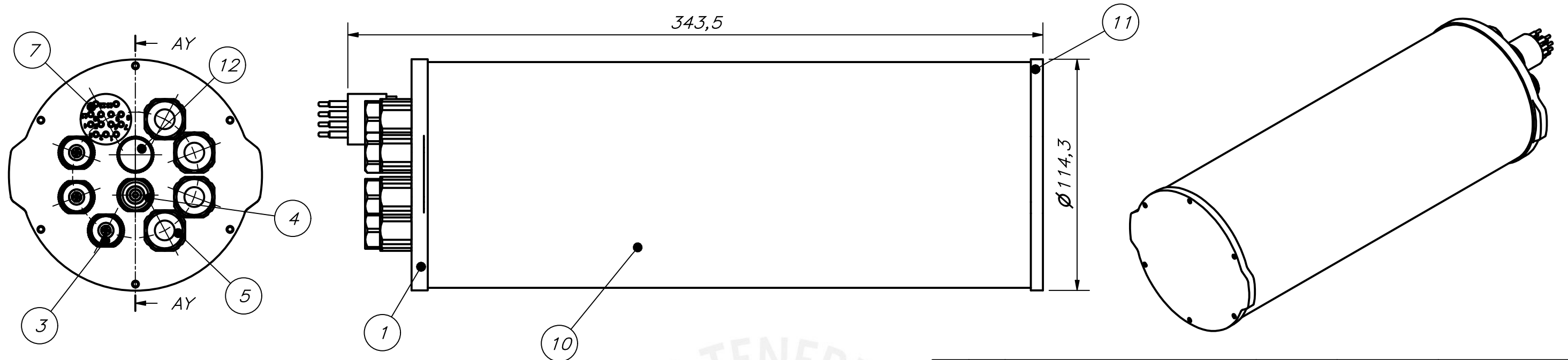
IMPRESIÓN 3D

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES	ESCALA
	SUJETADOR DE BATERÍA	2:1
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G3-D04-A4



IMPRESIÓN 3D

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES	ESCALA
	BANDEJA DE COMPONENTES	1:1
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G3-D05-A3

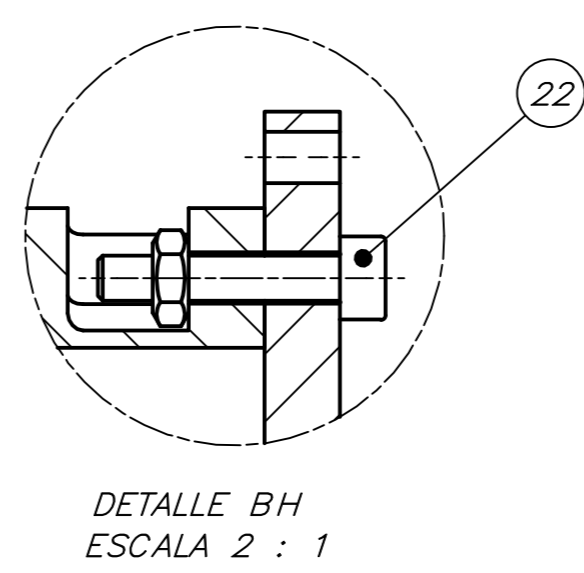
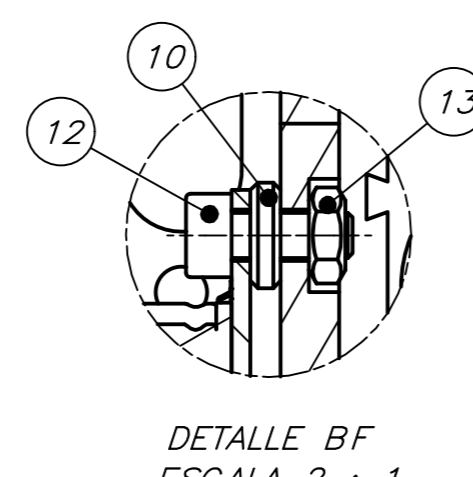
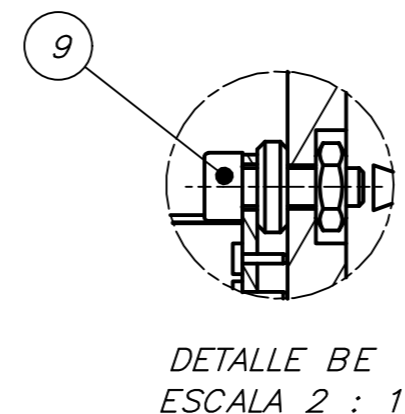
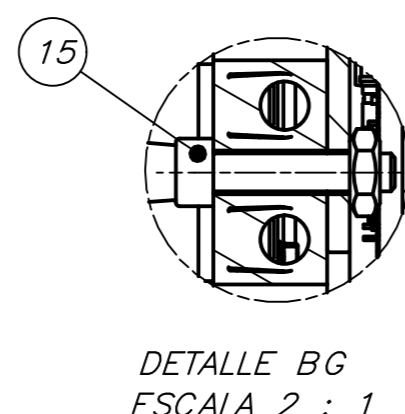
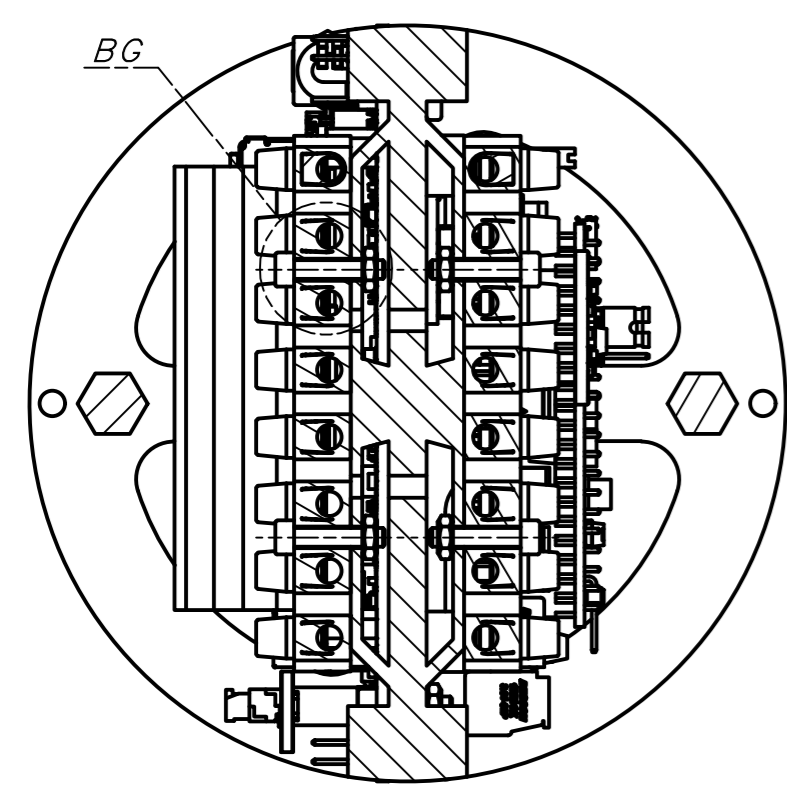
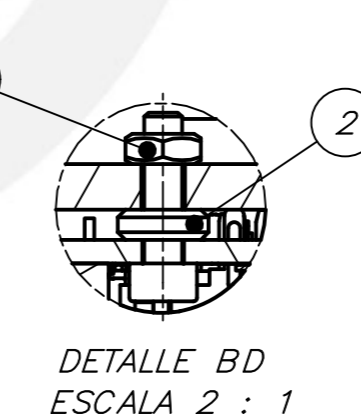
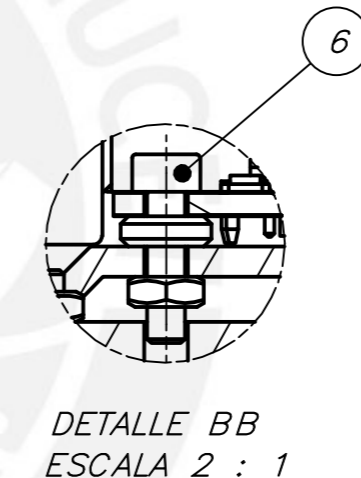
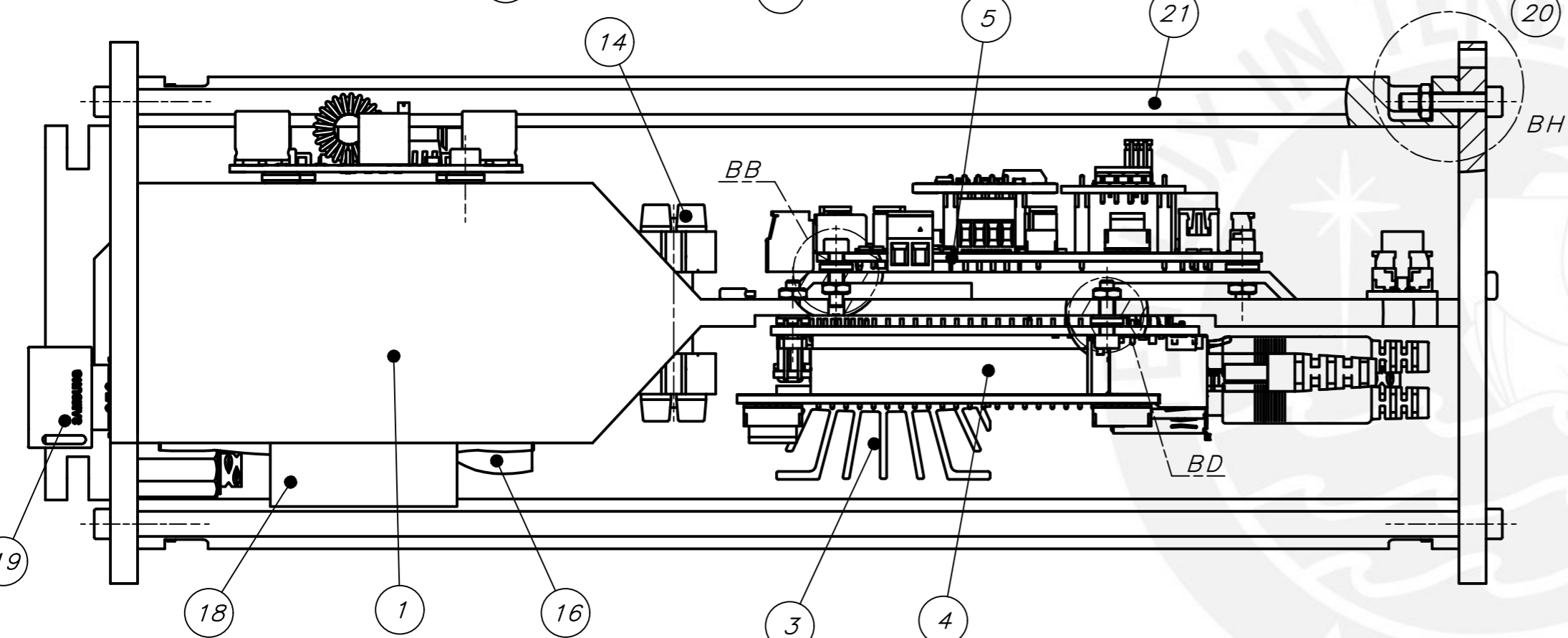
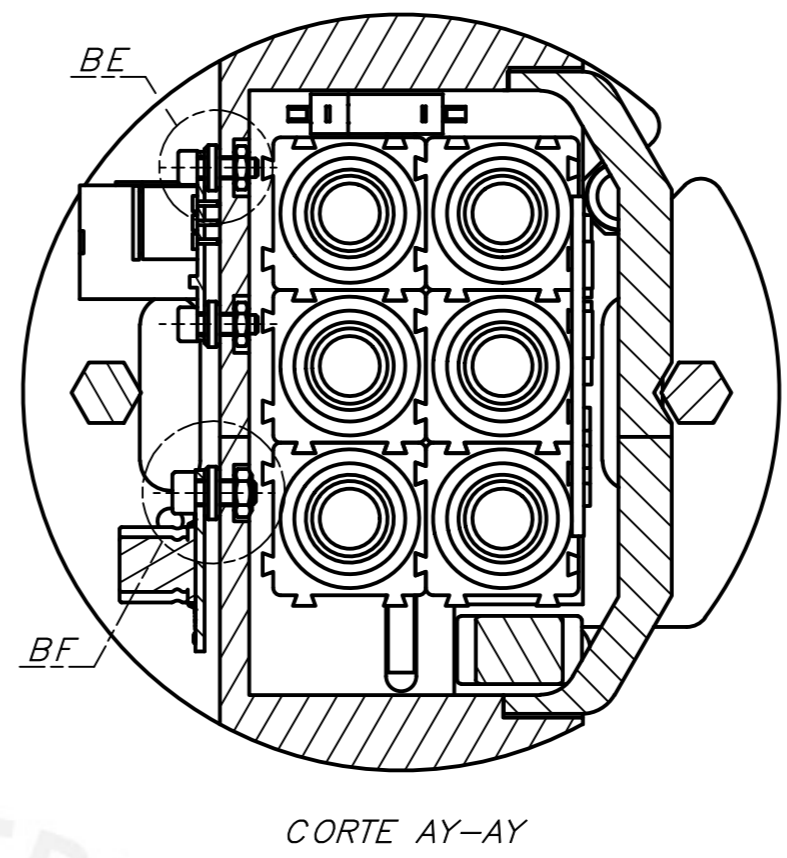
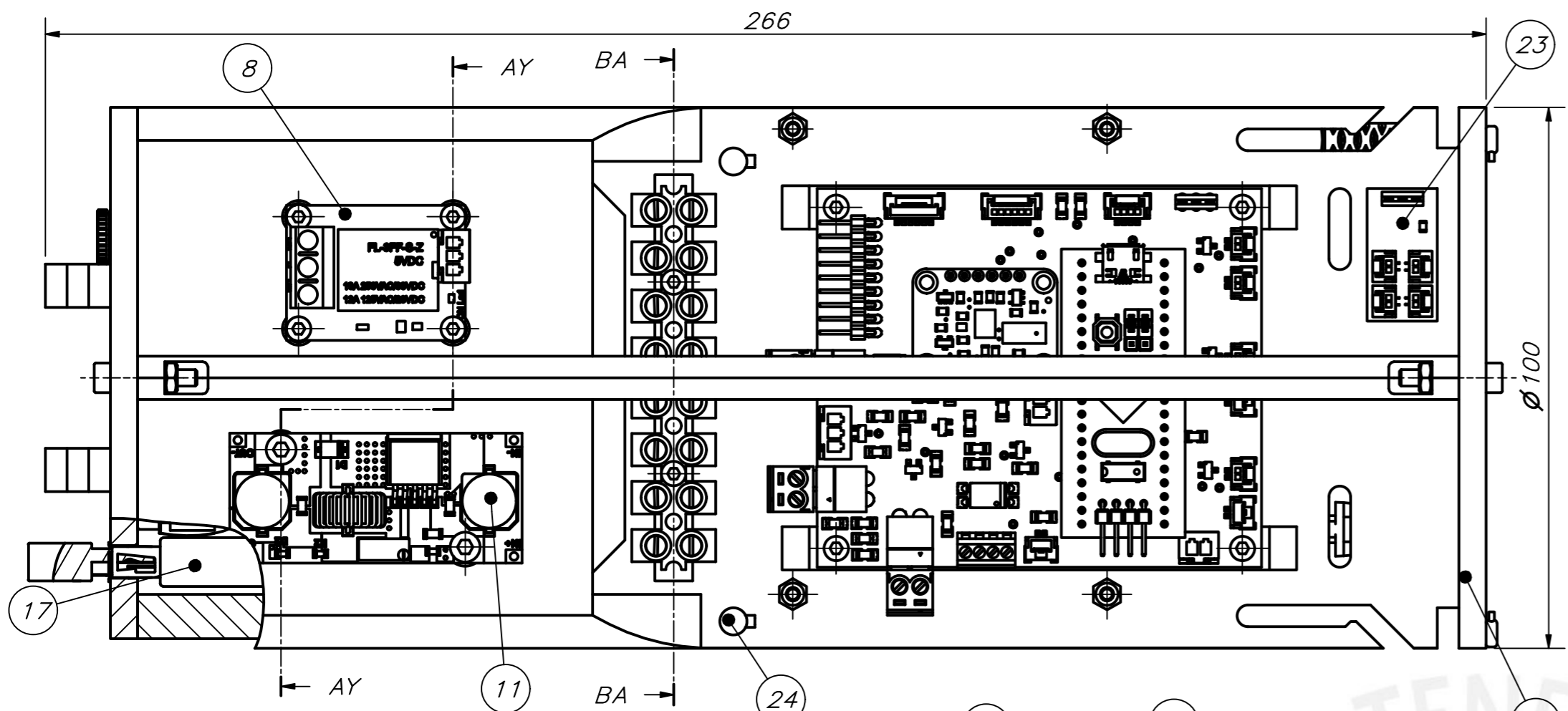


DETALLE BA
ESCALA 1 : 1

12	1	TAPÓN DE VENTILACIÓN	-	-	BLUERBOTICS - VENT PLUG
11	1	SELLO LATERAL DE 4" CERRADO	-	AA6061-T6	G4-D06-A3
10	1	TUBO DE CIERRE DE 4"	-	AA6061-T6	BLUERBOTICS - ALUMINIUM TUBE 298mm (3")
9	4	TORNILLO ALLEN M3X8	ISO 4762	AISI 304	-
8	1	SUBENSAMBLE DE BANDEJA - 750m	-	-	G3-E01-A2
7	1	PENETRATOR PARA ROV	-	-	MACARTNEY - DBH13M
6	1	PENETRATOR PARA VÁLVULA DE ESCAPE	-	-	BLUERBOTICS - VENT BOLT
5	4	PENETRATOR PARA LUCES SUBMARINAS	-	-	BLUERBOTICS - M14 WETLINK PENETRATOR FOR 9mm CABLE
4	1	SENSOR DE PRESIÓN	-	-	BLUERBOTICS - BAR100
3	3	PENETRATOR PARA COMUNICACIÓN	-	-	BLUERBOTICS - M10 CABLE PENETRATOR FOR 8mm CABLE
2	4	O-RING RADIAL 239	AS568	NBR70	LUBRICADO CON GRASA DE SILICONA
1	2	SELLO LATERAL DE 4" PARA PENETRATORS	-	AA6061-T6	G3-D07-A3
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

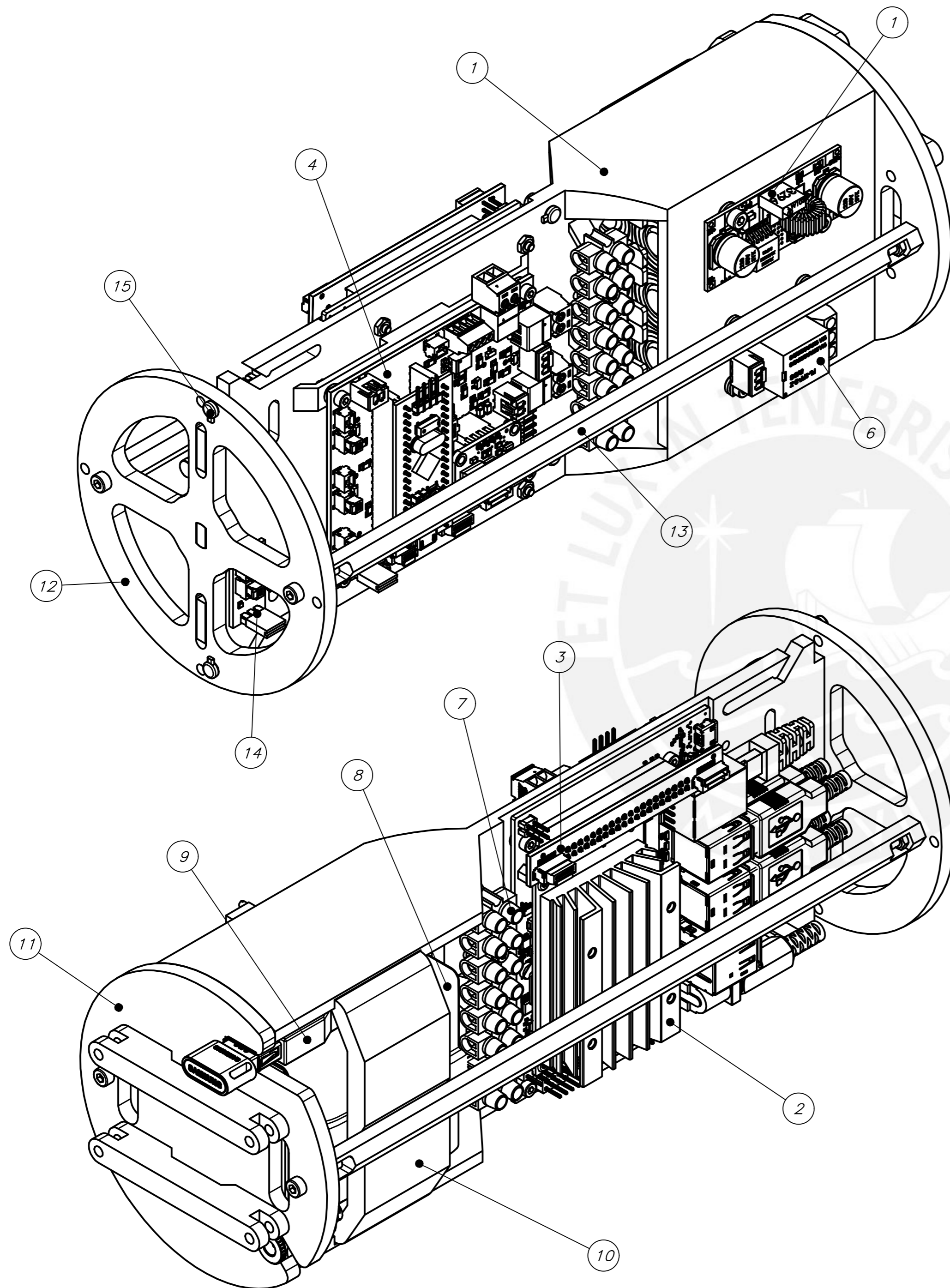
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES	ESCALA
	ENCLOSURE PRINCIPAL - 750m	1:2
ELABORADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G3-E03-A3



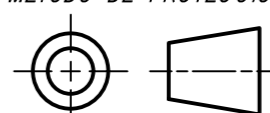
24	4	TIP SOS	-	-	BLUERBOTICS - SOS PROBE TIP
23	1	SENSOR DE FUGA	-	-	BLUERBOTICS - LEAK SENSOR
22	4	TORNILLOS ALLEN M3X16	ISO 4762	AISI 304	-
21	2	UNIÓN PARALELA	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G3-D03-A4
20	1	SOPORTE TRASERO DE BANDEJA	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G3-D02-A4
19	1	SOPORTE DELANTERO DE BANDEJA	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G3-D01-A4
18	1	SUJETADOR DE BATERÍA	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G3-D04-A4
17	1	PLUG USB-A	-	-	TECHSOLVERS - CABLE EXTENSIÓN USB
16	1	BATERÍA	-	-	DOC ELECTRONIC PERU - BATERÍA 12.6V 3S
15	4	TORNILLOS ALLEN M2,5X12	ISO 4762	AISI 304	-
14	2	BORNERA 5A 1x8	-	-	-
13	6	TUERCA HEXAGONAL M3	ISO 4032	AISI 304	-
12	2	TORNILLOS ALLEN M3X8	ISO 4762	AISI 304	-
11	1	REGULADOR A 5V	-	-	NAVILAMP - XL4015
10	2	SEPARADOR M3X2	-	COMPUESTO PLA-CFRP	-
9	4	TORNILLOS ALLEN M2,5X8	ISO 4762	AISI 304	-
8	1	MÓDULO RELÉ	-	-	MASTERTRONIC - MÓDULO RELÉ 1 CANAL 5V
7	16	TUERCA HEXAGONAL M2,5	ISO 4032	AISI 304	-
6	8	TORNILLOS ALLEN M2,5X10	ISO 4762	AISI 304	-
5	1	PLACA DE CIRCUITO IMPRESO	-	-	E1-01-A4
4	1	SHIELD JETSON NANO	-	-	E1-02-A5
3	1	COMPUTADOR DE PLACA ÚNICA	-	-	AMAZON - JETSON NANO DEVELOPER KIT
2	12	SEPARADOR M2,5X2	-	COMPUESTO PLA-CFRP	-
1	1	BANDEJA DE COMPONENTES	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G3-D05-A3
POS. CANT.		DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES	ESCALA
	SUBENSAMBLE DE BANDEJA - 750m	1:1
ELABORADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G3-E04-A2

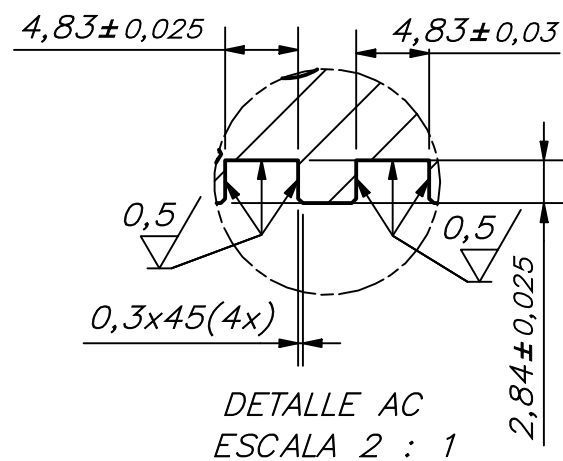
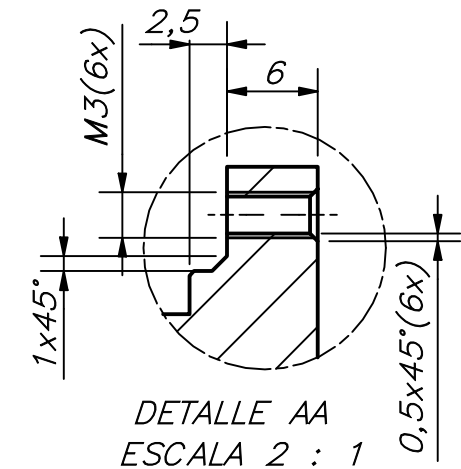
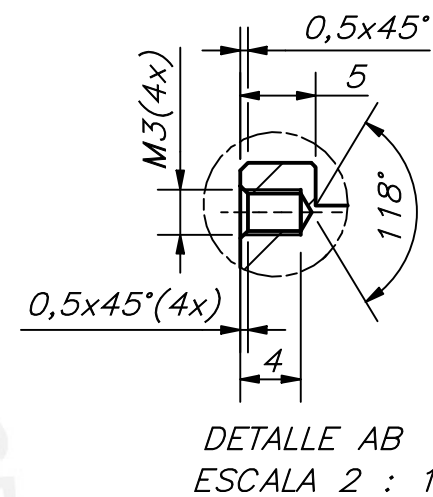
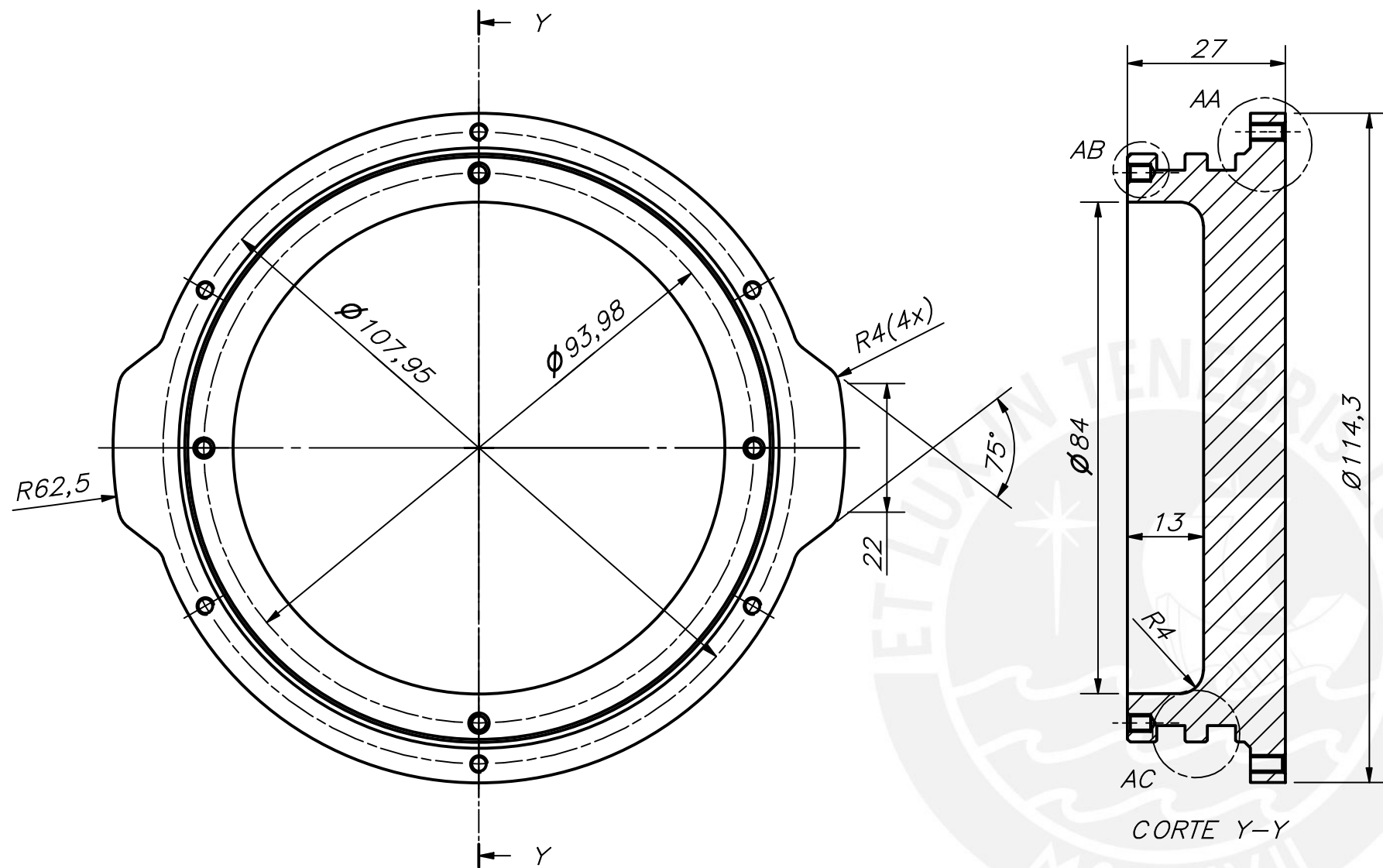


18	4	TIP SOS	-	-	BLUERBOTICS - SOS PROBE TIP
14	1	SENSOR DE FUGA	-	-	BLUERBOTICS - LEAK SENSOR
13	2	UNIÓN PARALELA	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G3-D03-A4
12	1	SOPORTE TRASERO DE BANDEJA	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G3-D02-A4
11	1	SOPORTE DELANTERO DE BANDEJA	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G3-D01-A4
10	1	SUJETADOR DE BATERÍA	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G3-D04-A4
9	1	PLUG USB-A	-	-	TECHSOLVERS - CABLE EXTENSIÓN USB
8	1	BATERÍA	-	-	DOC ELECTRONIC PERU - BATERÍA 12.6V 3S
7	2	BORNERA 5A 1X8	-	-	-
6	1	REGULADOR A 5V	-	-	NAYLAMP - XL4015
5	1	MÓDULO RELÉ	-	-	MASTERTRONIC - MÓDULO RELÉ 1 CANAL 5V
4	1	PLACA DE CIRCUITO IMPRESO	-	-	E1-01-A4
3	1	SHIELD JETSON NANO	-	-	E1-02-A5
2	1	COMPUTADOR DE PLACA ÚNICA	-	-	AMAZON - JETSON NANO DEVELOPER KIT
1	1	BANDEJA DE COMPONENTES	-	COMPUESTO PLA-CFRP	G3-D05-A3
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN:  SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES
SUBENSAMBLE DE BANDEJA - 750m - ISO ESCALA: **1:1**

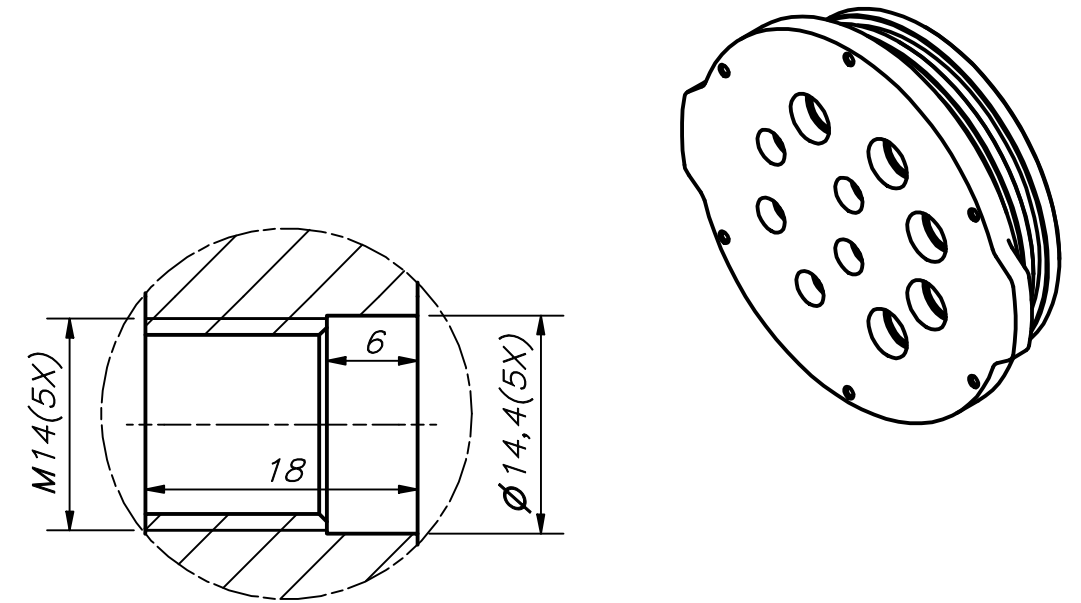
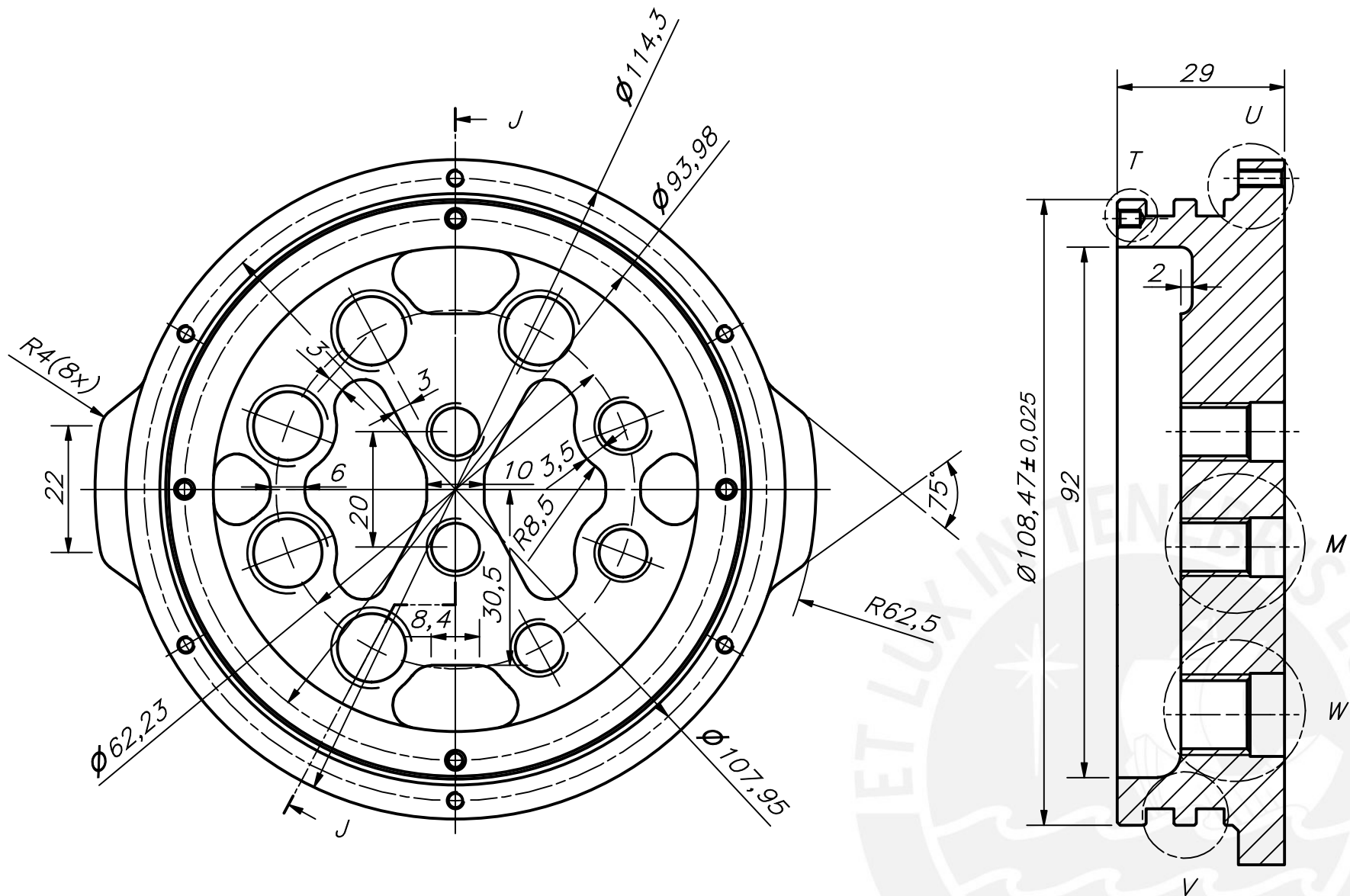
ELABORADO POR: MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR: ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN CÓDIGO: G3-E04-A2



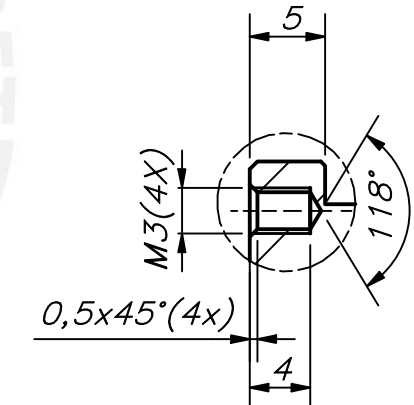
TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
FINO	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5

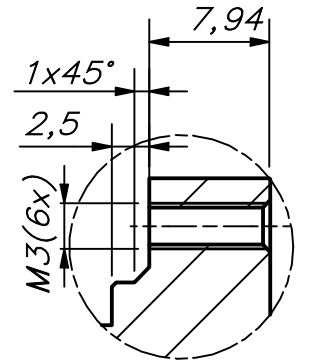
ACABADO SUPERFICIAL 3,2 / (0,5 /) ▽ (▽)	TOLERANCIA GENERAL * SEGÚN DIN ISO 2768-1 FINO	MATERIAL AA6061-T6
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES SELLO LATERAL DE 4” CERRADO	ESCALA 1:1
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G3-D06-A3



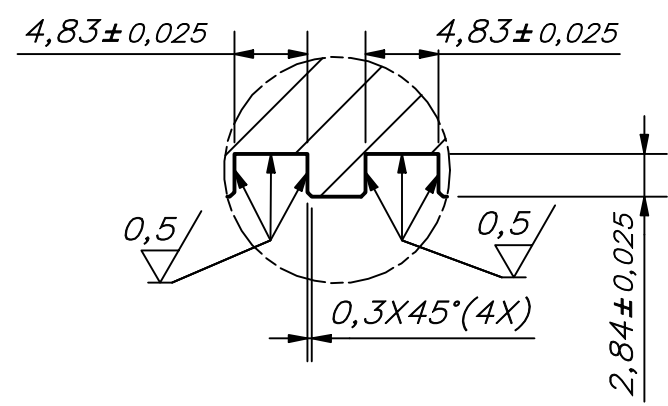
DETALLE W
ESCALA 2 : 1



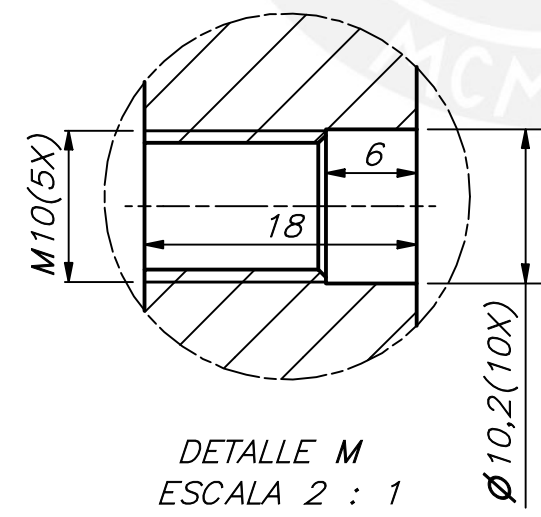
DETALLE T
ESCALA 2 : 1



DETALLE U
ESCALA 2 : 1



DETALLE V
ESCALA 2 : 1



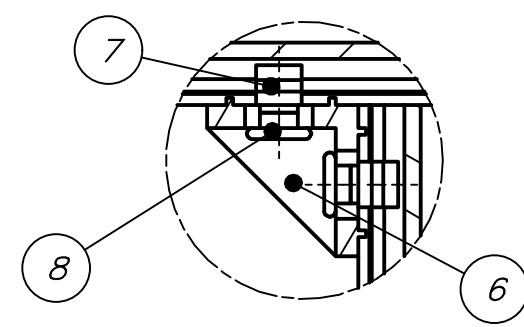
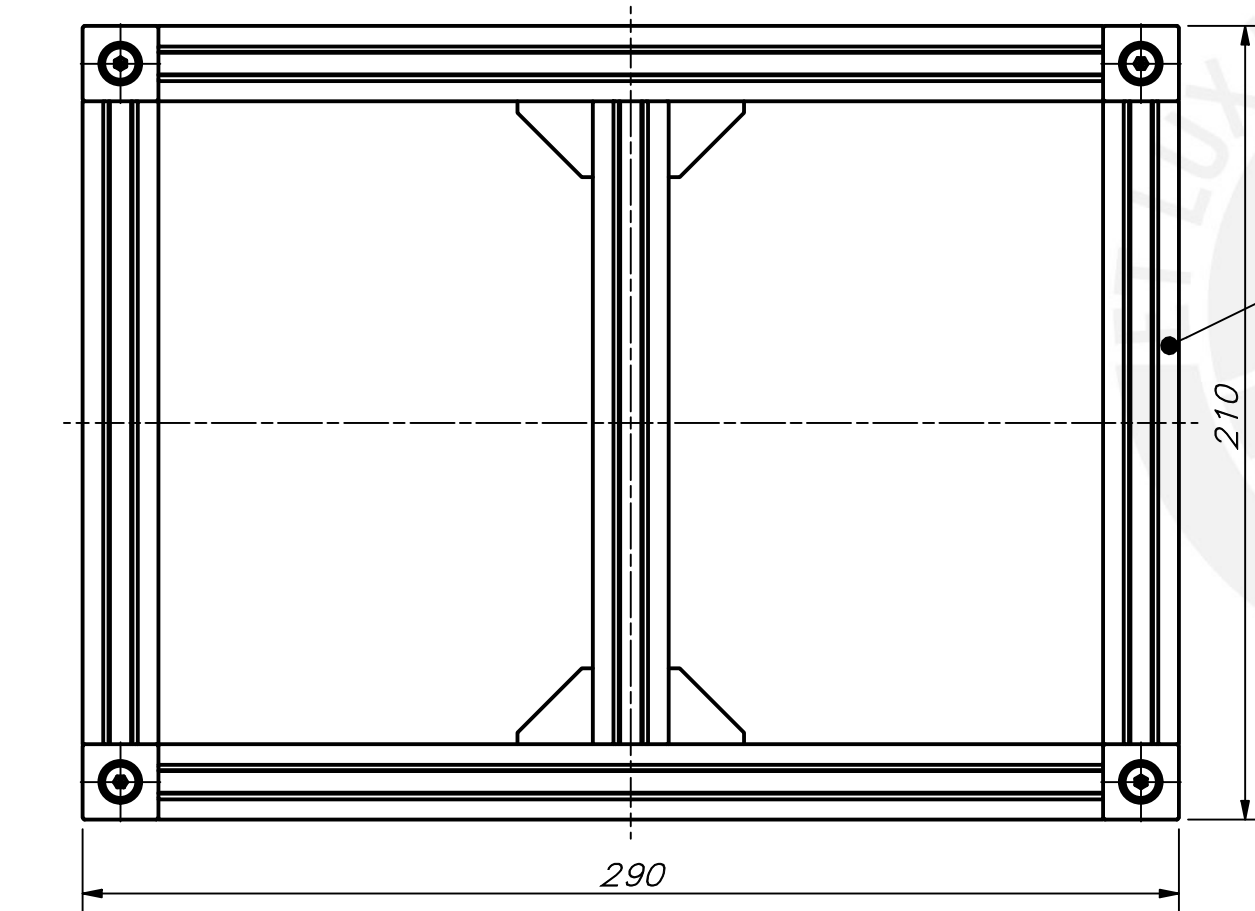
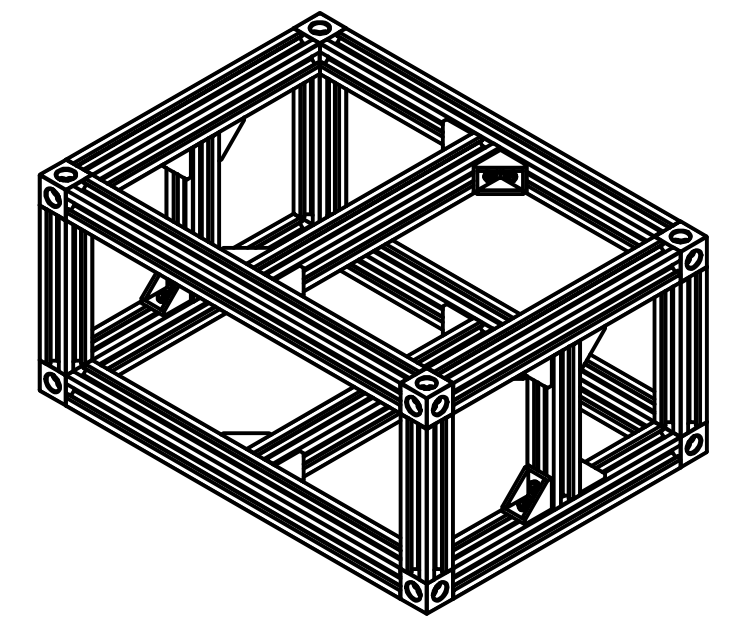
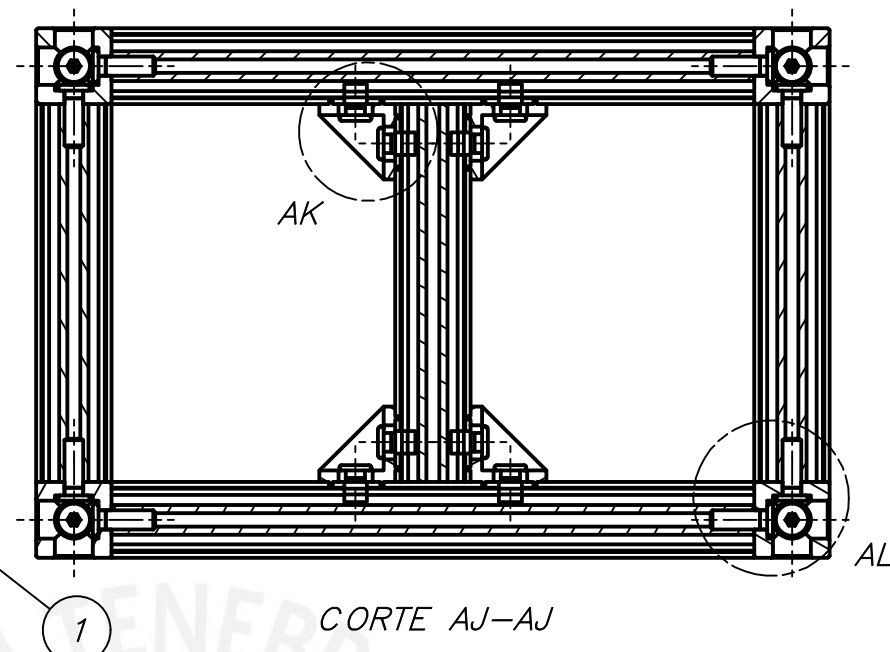
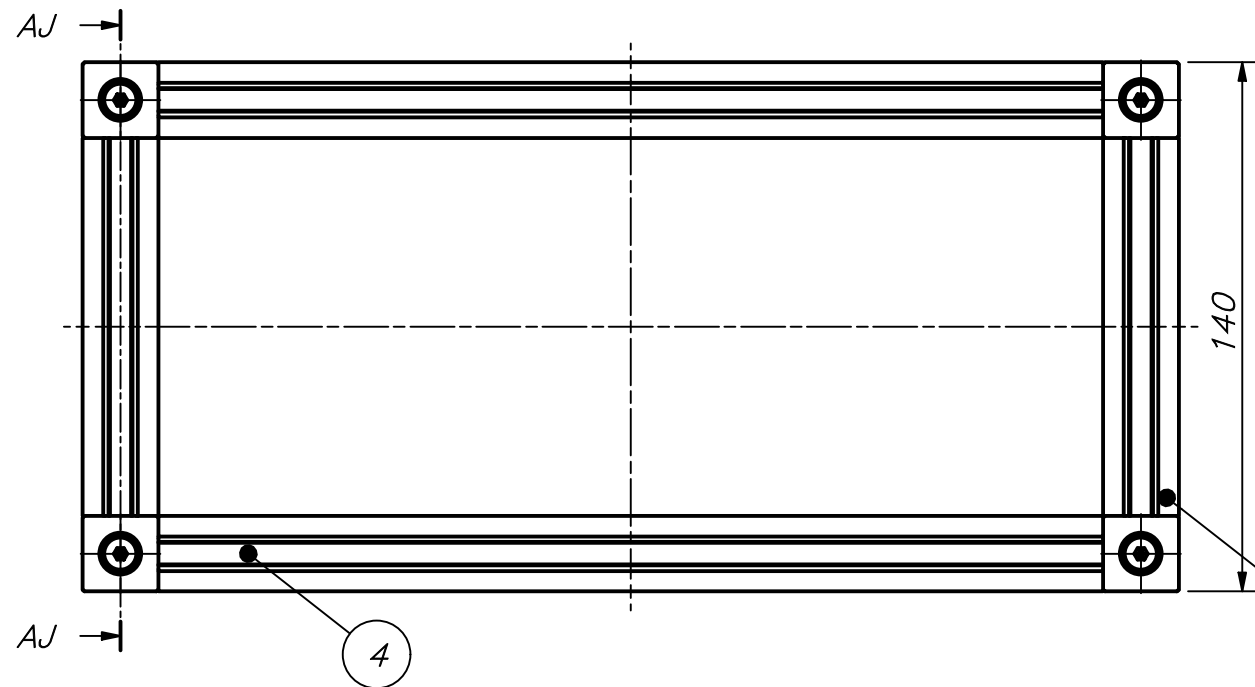
DETALLE M
ESCALA 2 : 1

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

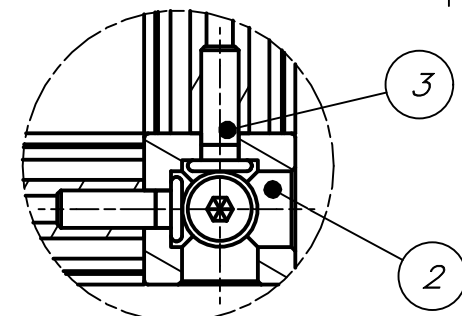
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
FINO	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5

REDONDEOS NO INDICADOS R4
CHAFLANES NO INDICADOR 0,5X45°

ACABADO SUPERFICIAL 3,2 / (0,5 /) ▽ (▽)	TOLERANCIA GENERAL * SEGÚN DIN ISO 2768-1 FINO	MATERIAL AA6061-T6
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES SELLO LATERAL DE 4" PARA PENETRATORS	ESCALA 1:1
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G3-D07-A3



DETALLE AK
ESCALA 1 : 1



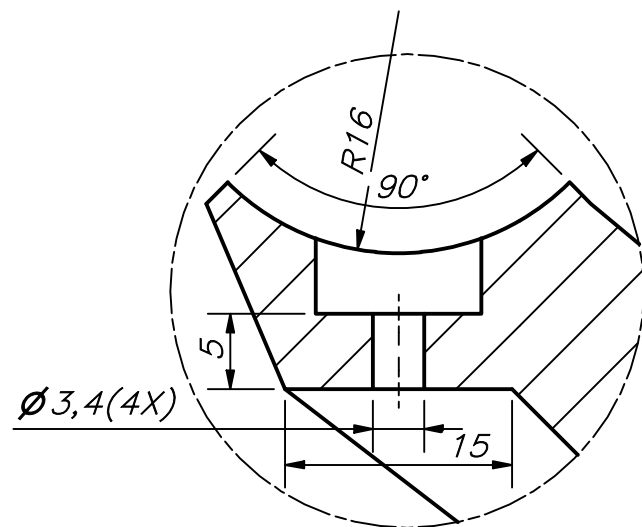
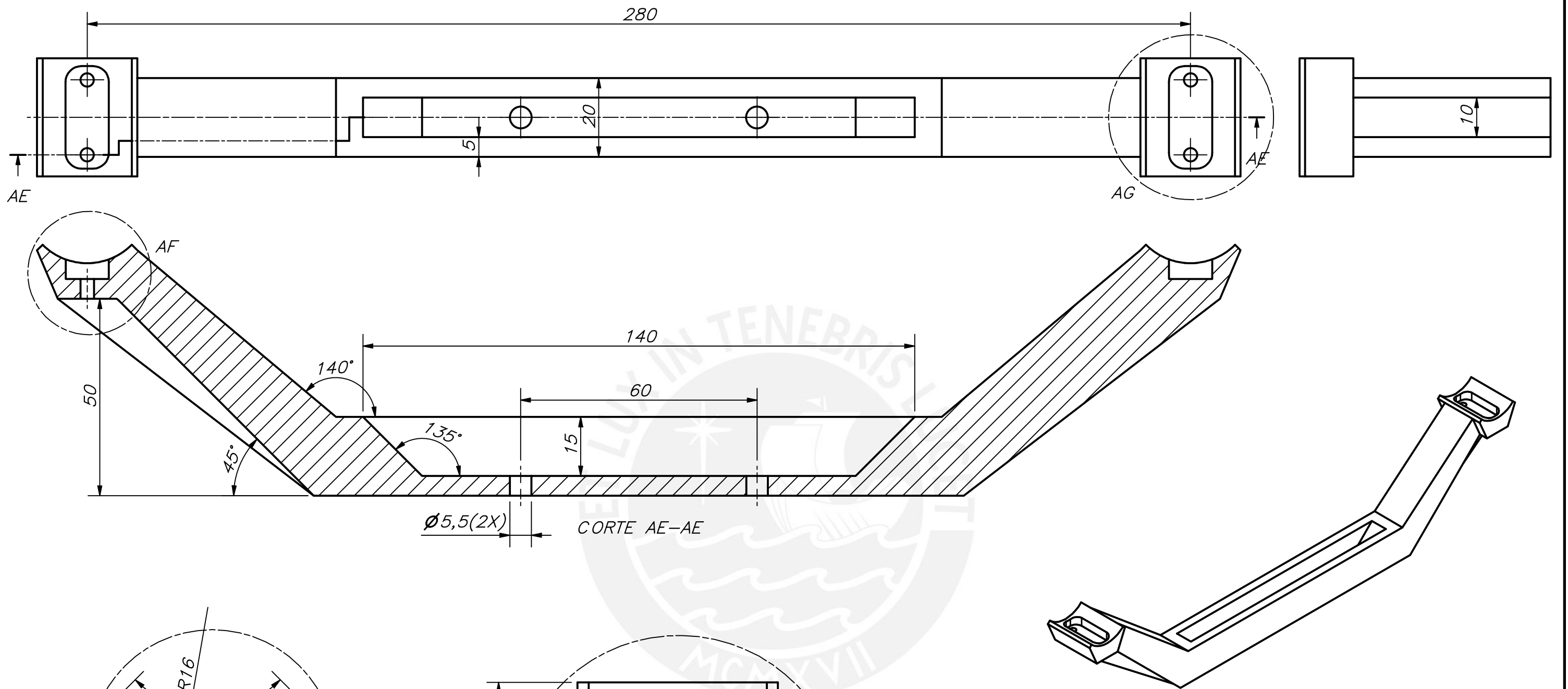
DETALLE AL
ESCALA 1 : 1

CORTE AJ-AJ

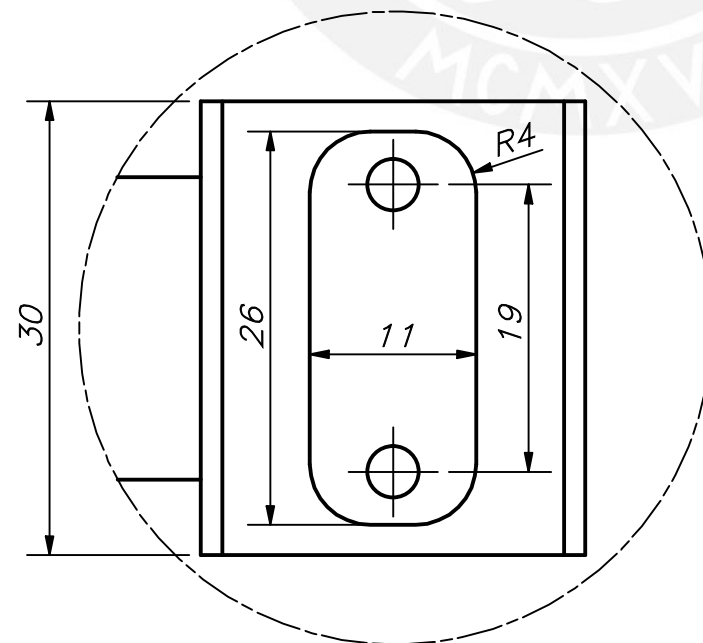
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
8	32	TORNILLO DE BAJO PERFIL M5X8	-	ACERO AL CARBONO	-
7	32	T-NUT	-	AA6061	-
6	16	CONECTOR DE ESQUINA A 90°	-	AA6061	-
5	6	V-SLOT 2020X170	-	AA6061	-
4	4	V-SLOT 2020X250	-	AA6061	-
3	24	TORNILLO DE BAJO PERFIL M5X15	-	ACERO AL CARBONO	-
2	8	CONECTOR ESQUINA DE 3 VÍAS	-	AA6061	-
1	6	V-SLOT 2020X100	-	AA6061	-

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES	ESCALA
	ESTRUCTURA DE SOPORTE	1:2
ELABORADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G4-E01-A3



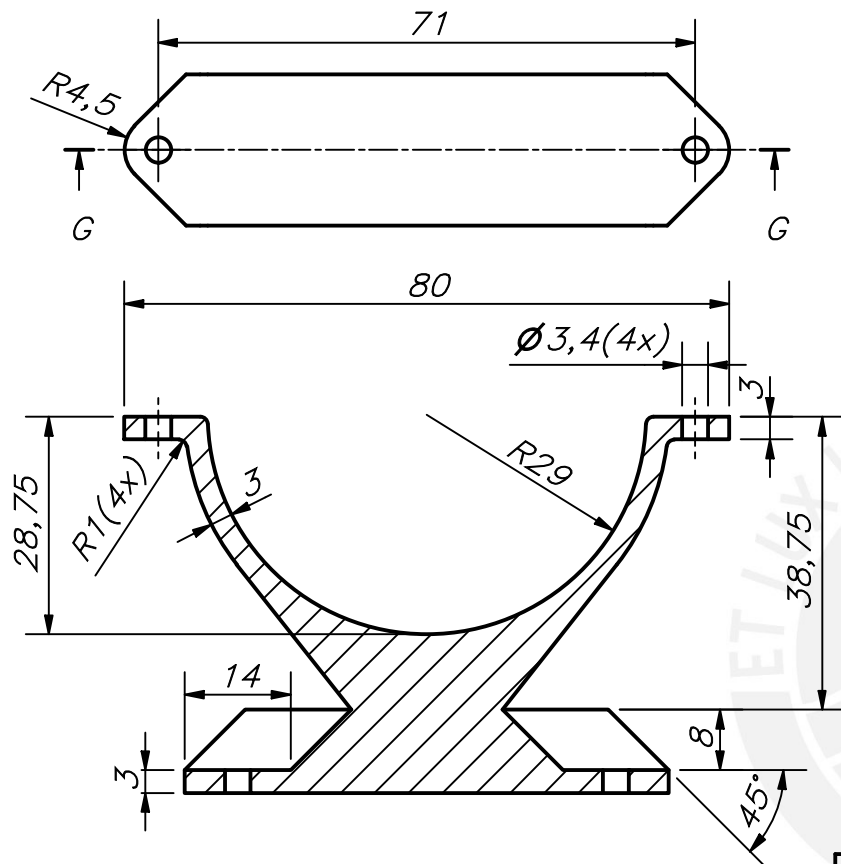
DETALLE AF
ESCALA 2 : 1



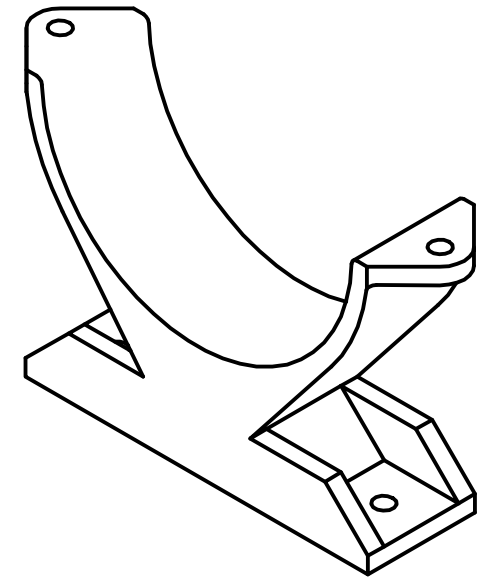
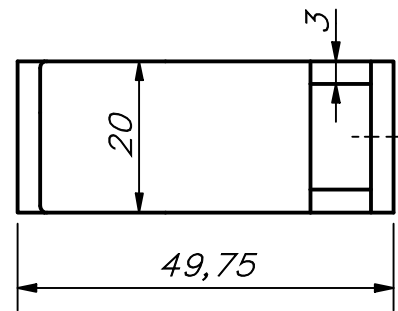
DETALLE AG
ESCALA 2 : 1

IMPRESIÓN 3D

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES	ESCALA
	SUJETADOR DE LUCES	1:1
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G4-D01-A3

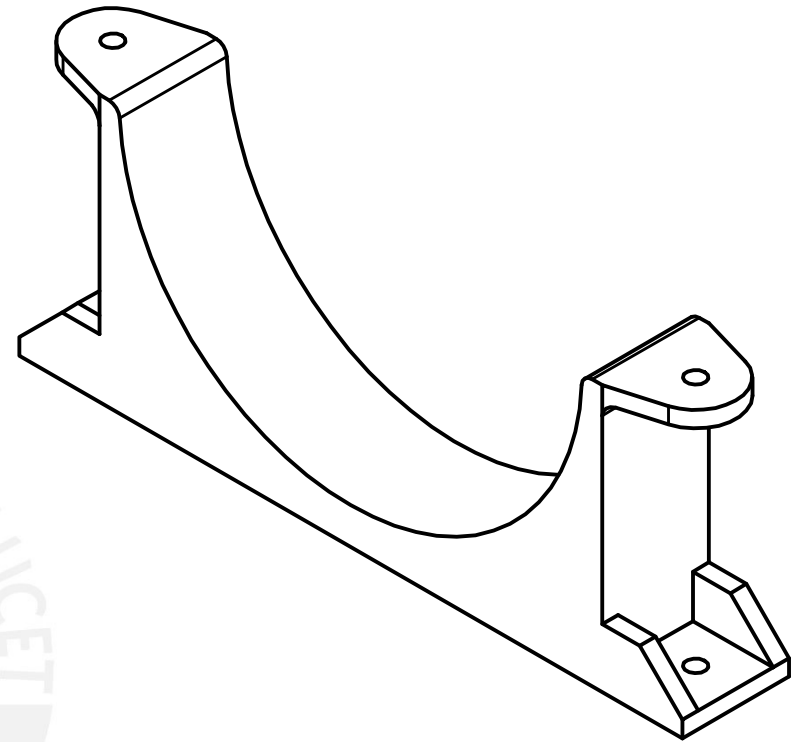
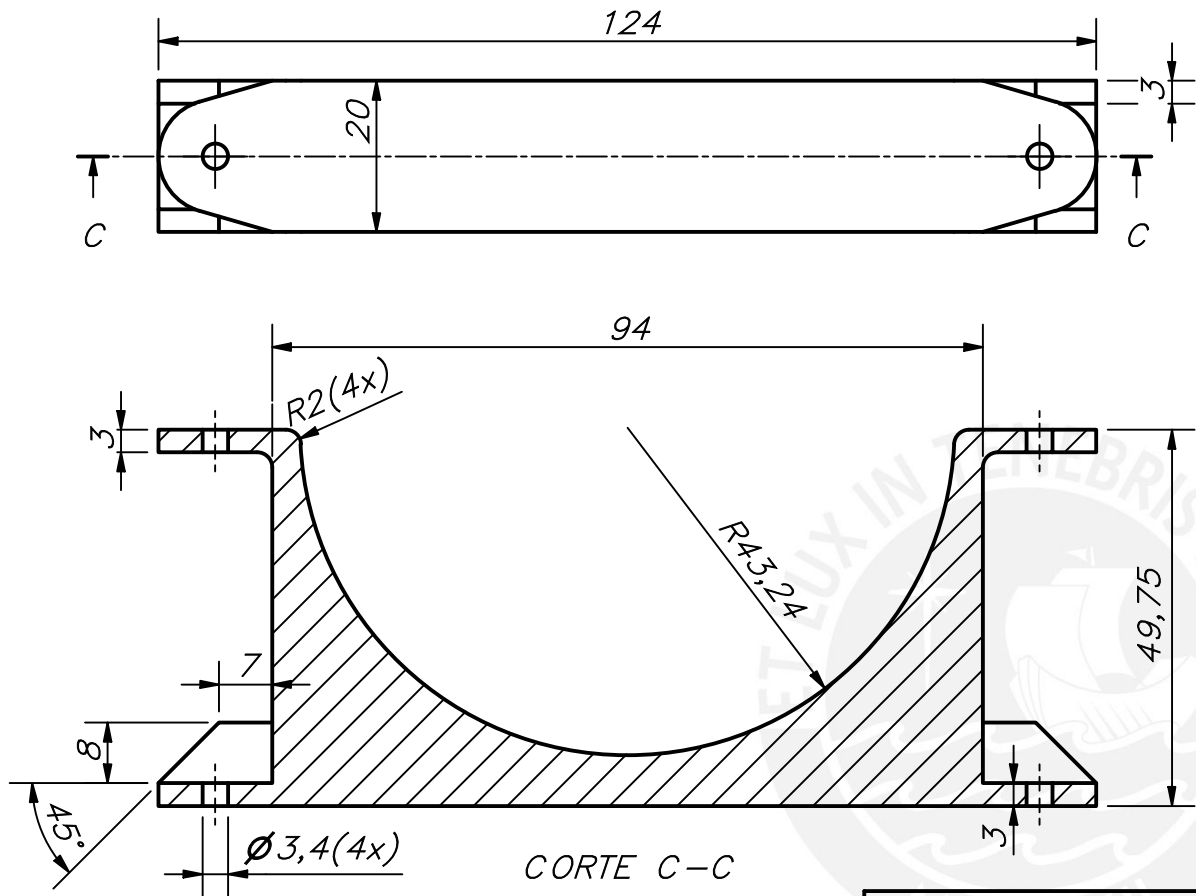


CORTE G-G



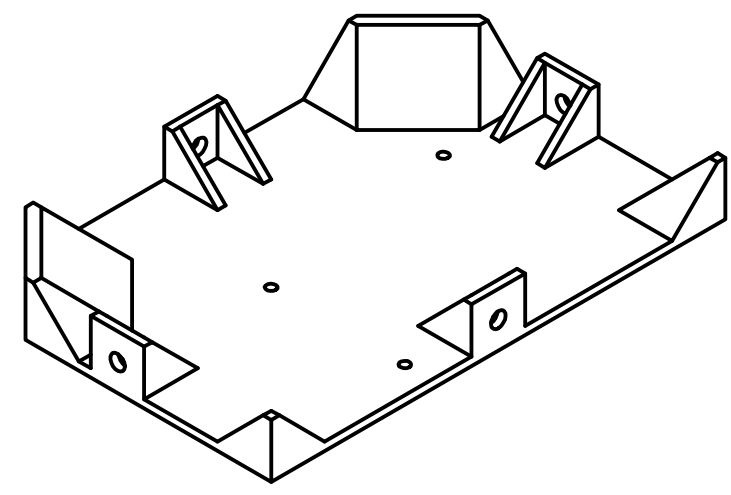
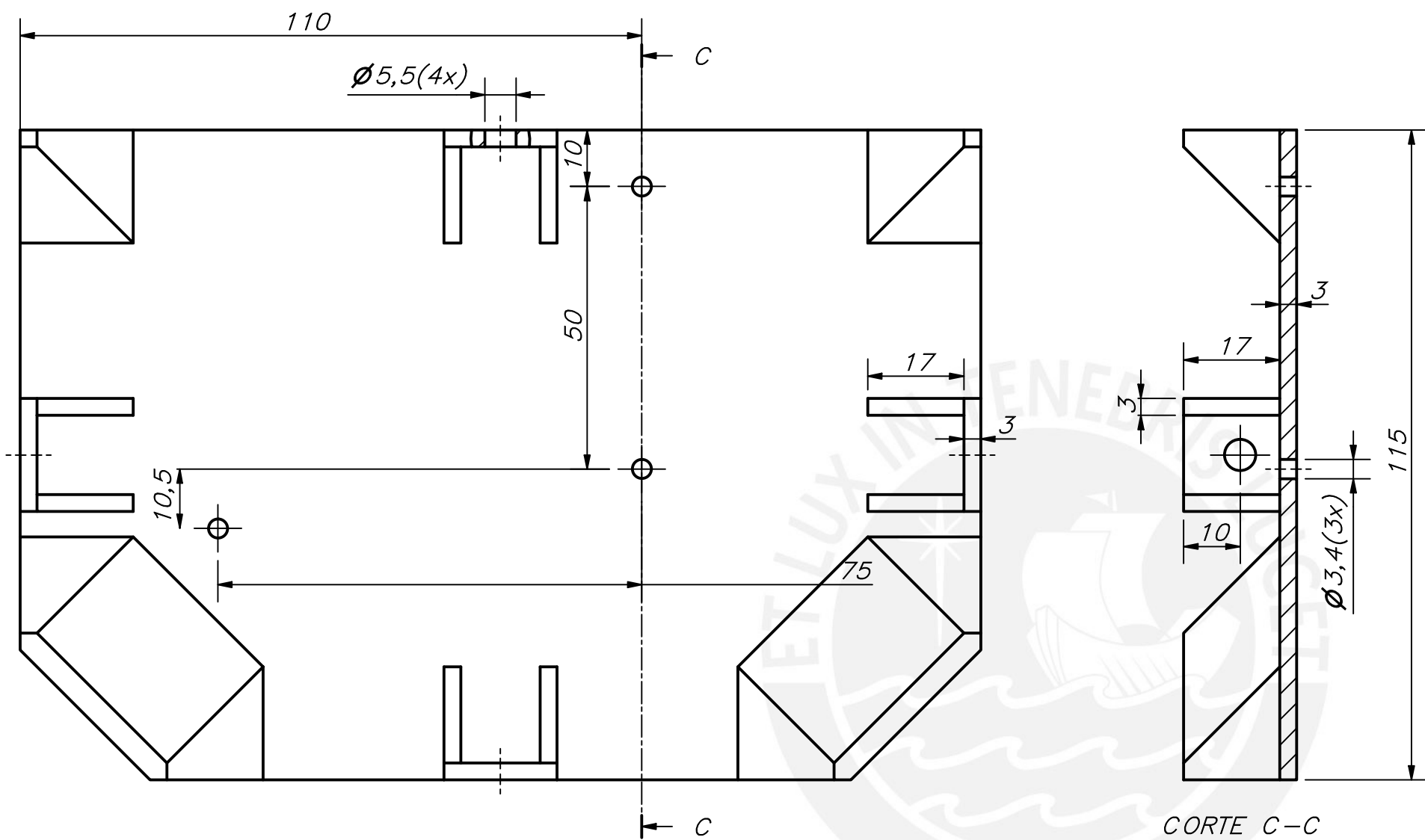
IMPRESIÓN 3D

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES SOP. ENCLOSURE SECUNDARIO LATERAL	ESCALA 1:1
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G4-D02-A4



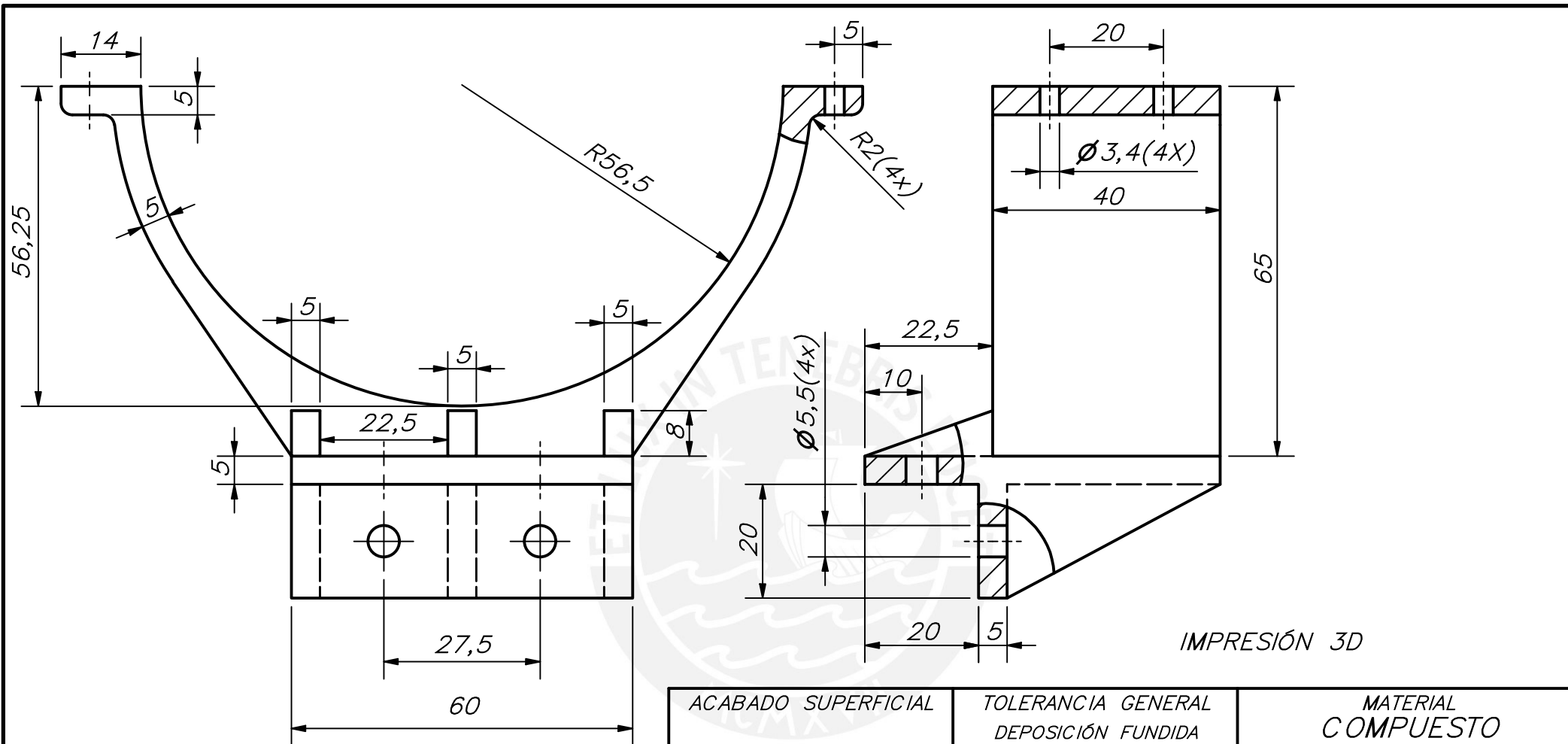
IMPRESIÓN 3D

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES	ESCALA
	SOP. ENCLOSURE SECUNDARIO CENTRAL	1:1
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G4-D03-A4

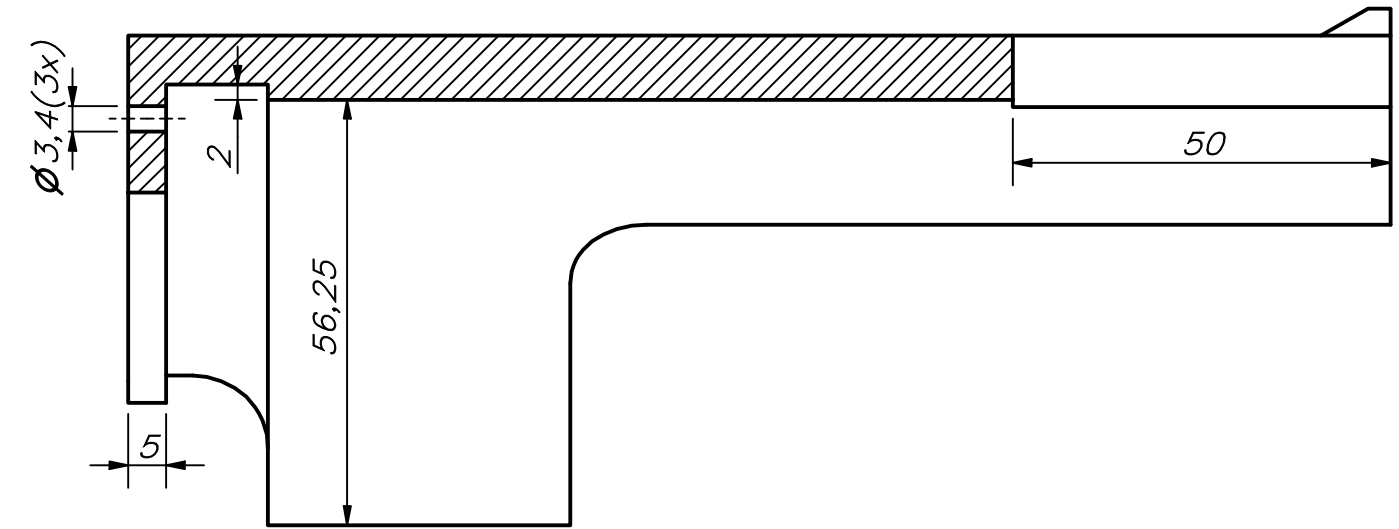
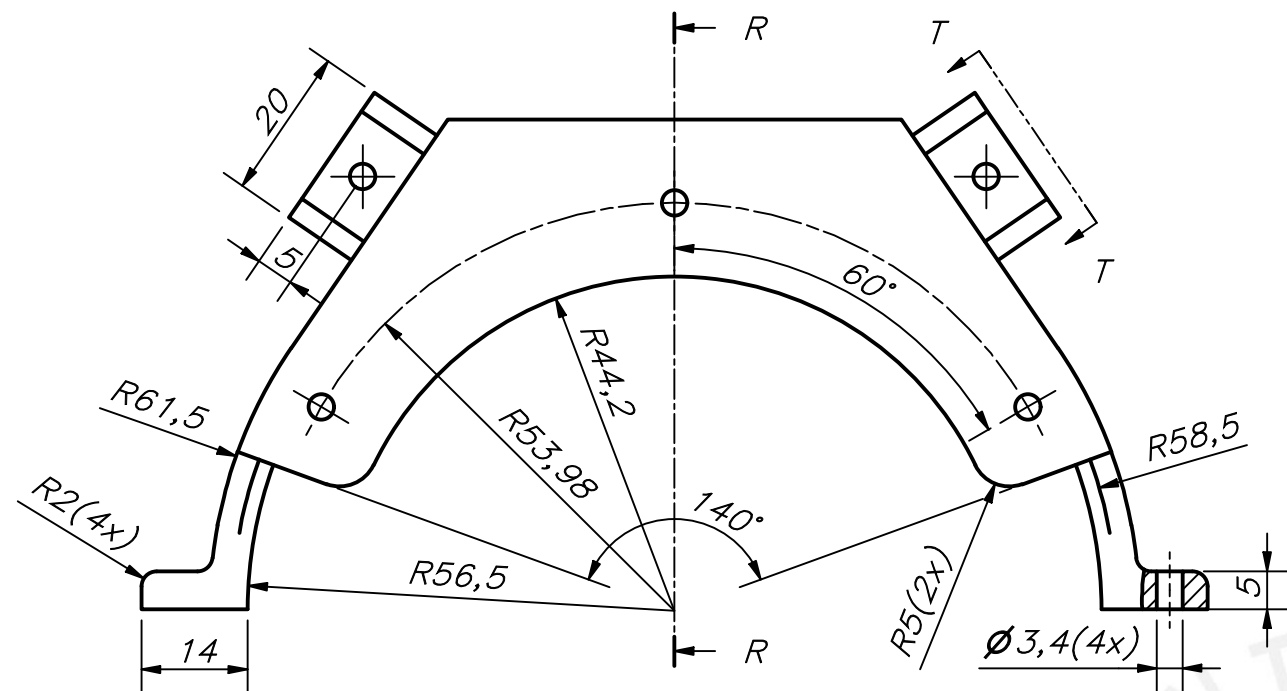


IMPRESIÓN 3D

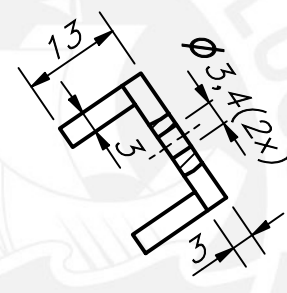
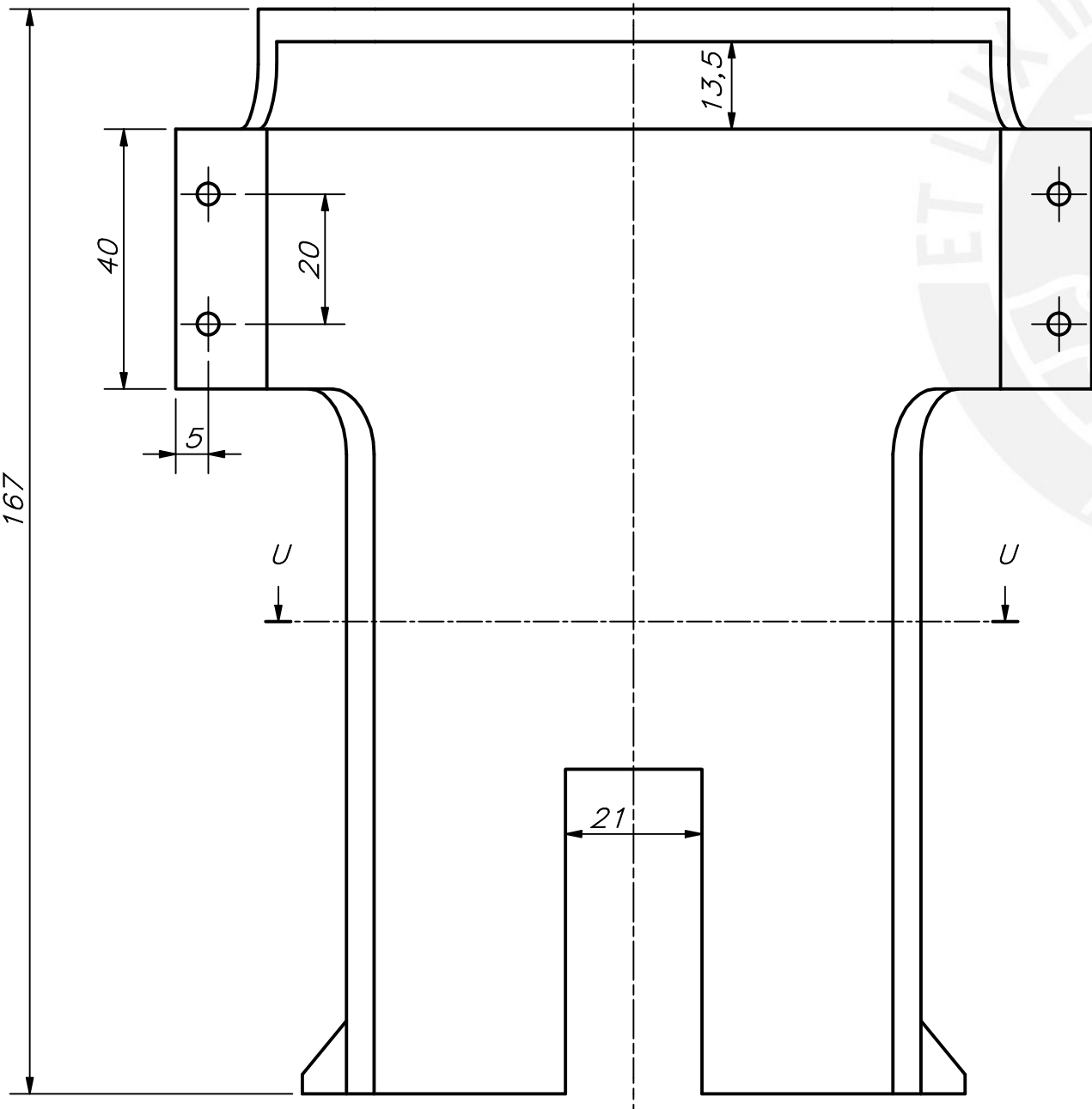
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES BASE DE SOPORTE DERECHA	ESCALA 1:1
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G4-D04-A3



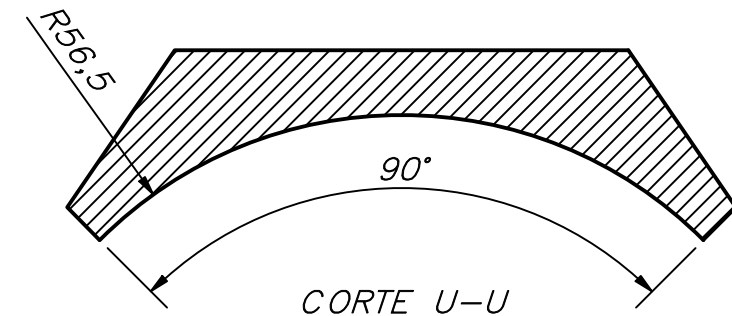
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES SOP. INF. DE ENC. PRINCIPAL	ESCALA 1:1
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G4-D06-A4



CORTE R-R



VISTA T-T

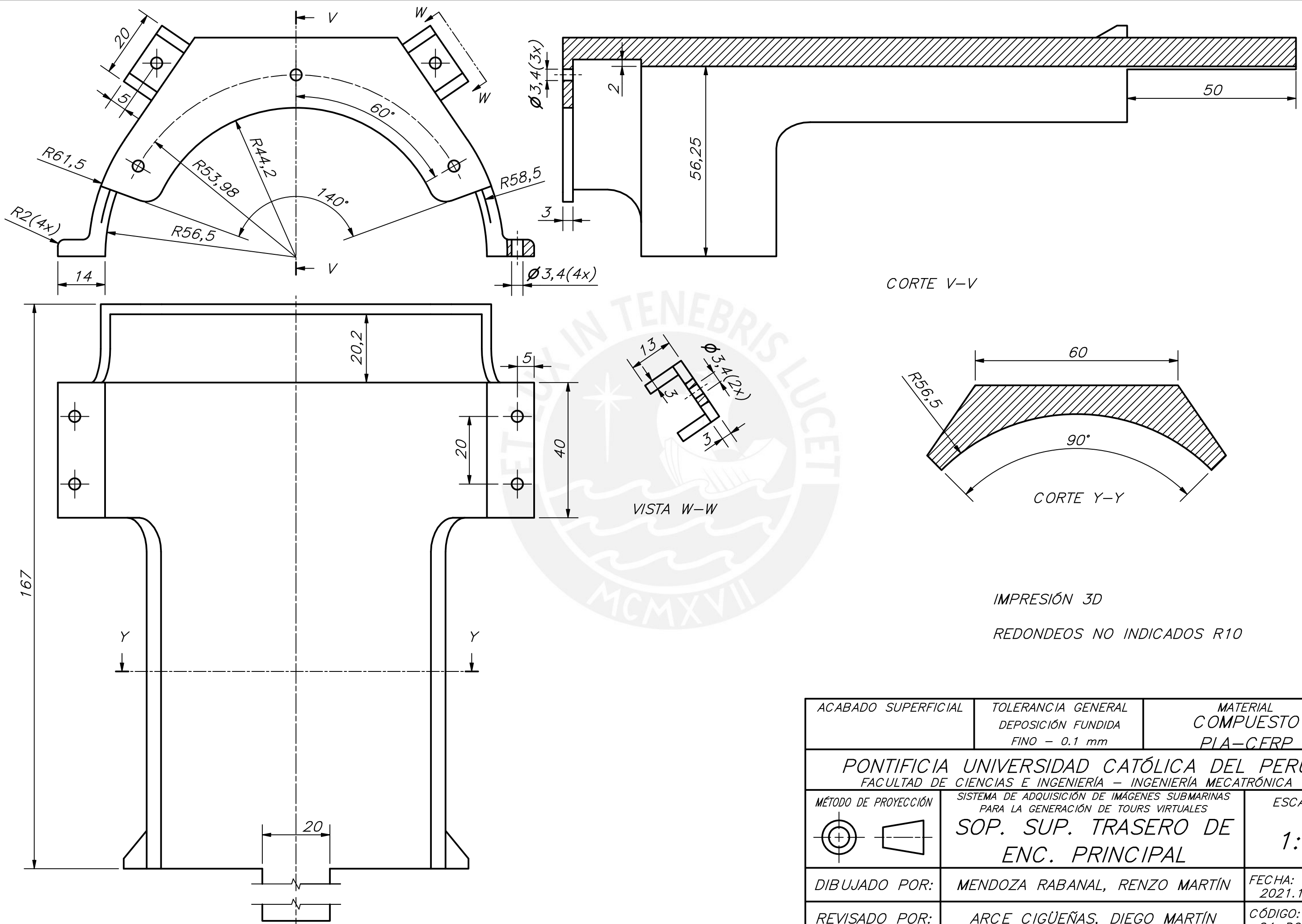


CORTE U-U

IMPRESIÓN 3D

REDONDEOS NO INDICADOS R10

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES SOP. SUP. DELANTERO DE ENC. PRINCIPAL	ESCALA 1:1
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G4-D07-A3



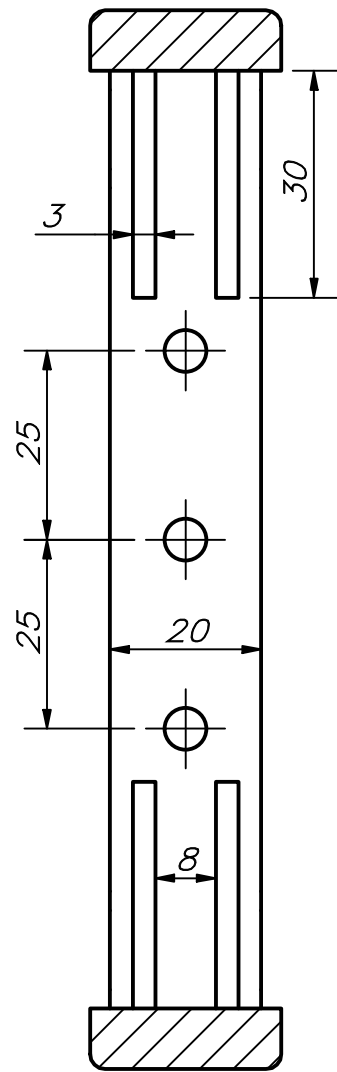
CORTE V-V

CORTE Y-Y

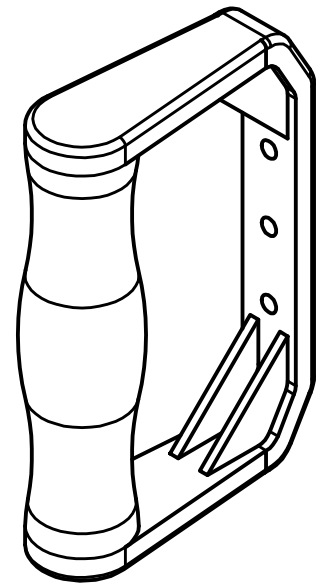
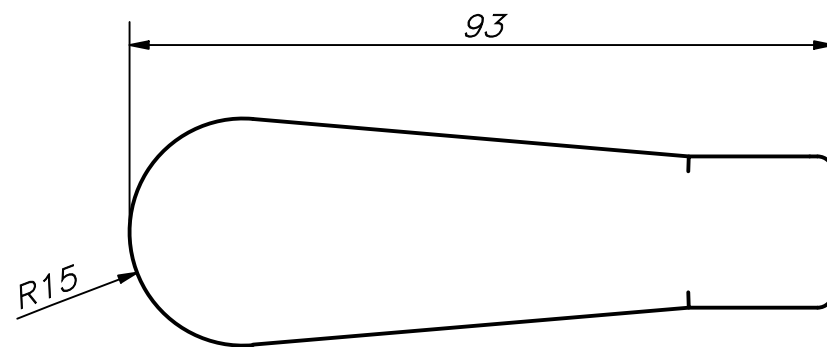
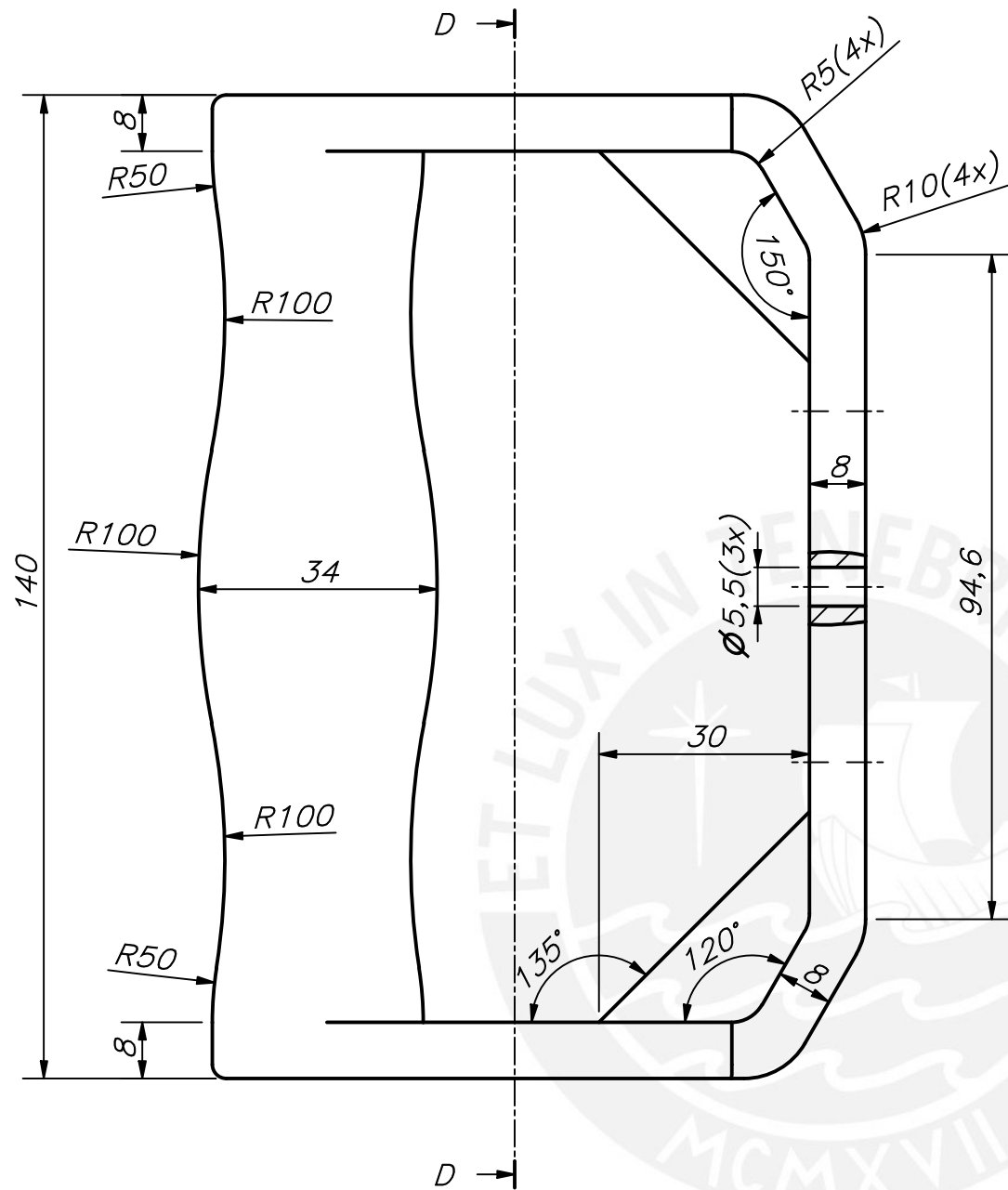
VISTA W-W

IMPRESIÓN 3D
 REDONDEOS NO INDICADOS R10

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES SOP. SUP. TRASERO DE ENC. PRINCIPAL	ESCALA 1:1
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G4-D07-A3



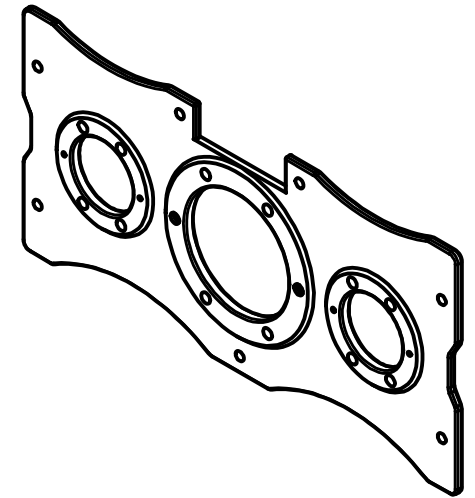
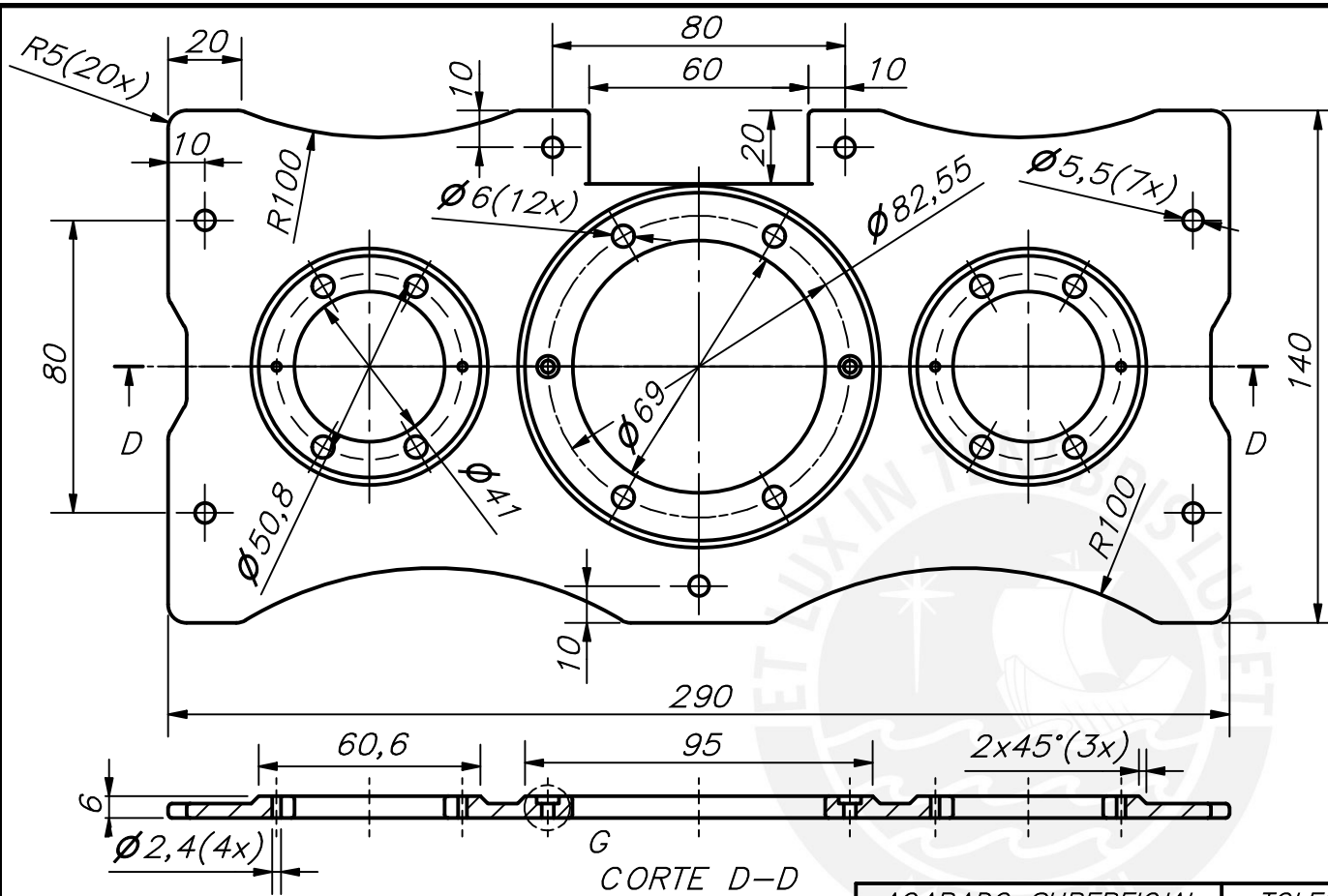
CORTE D-D



REDONDEOS NO INDICADOS R2

IMPRESIÓN 3D

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES	ESCALA
	SUJETADOR MANUAL	1:1
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G4-D09-A3

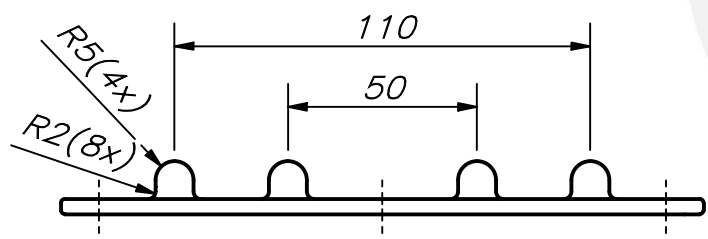
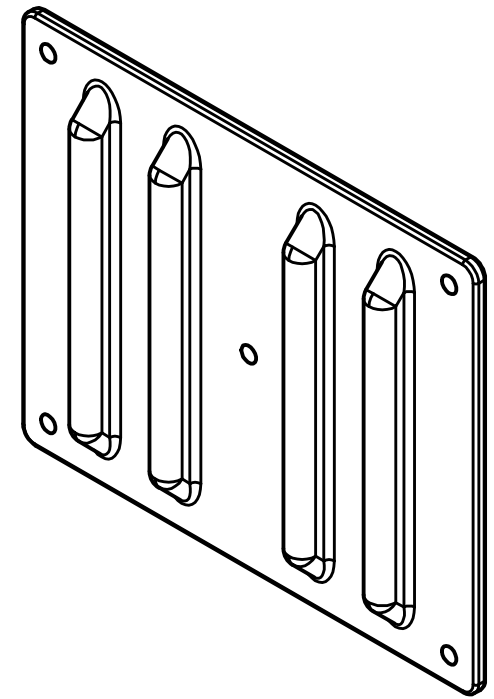
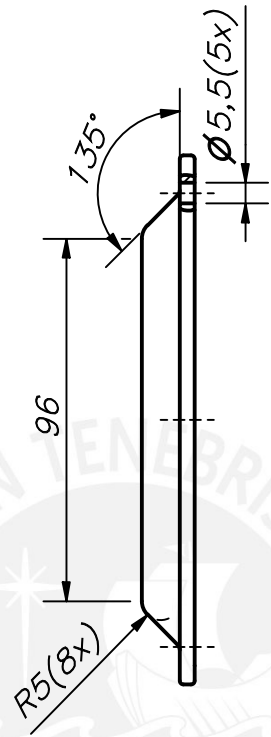
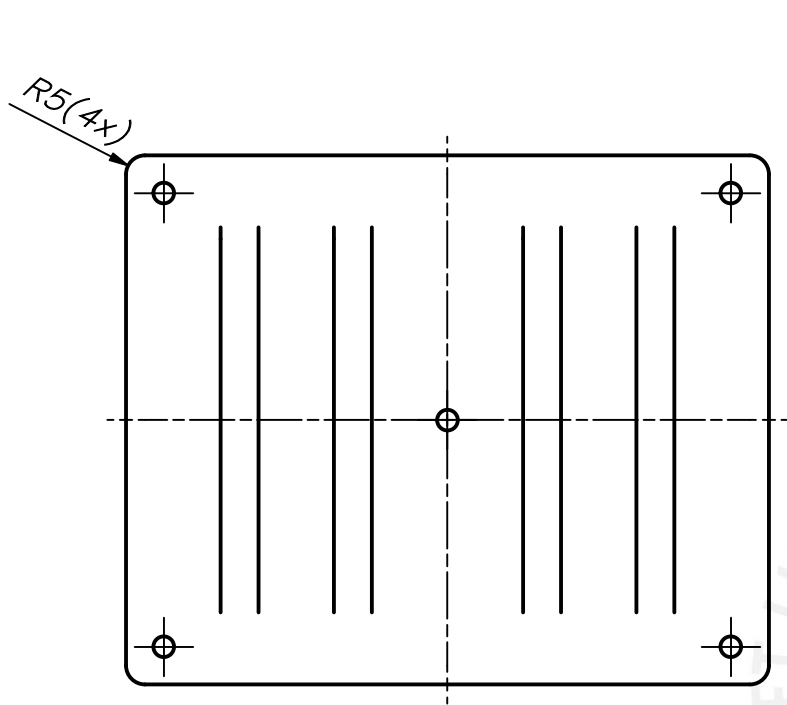


REDONDEOS NO INDICADOS R1

IMPRESIÓN 3D

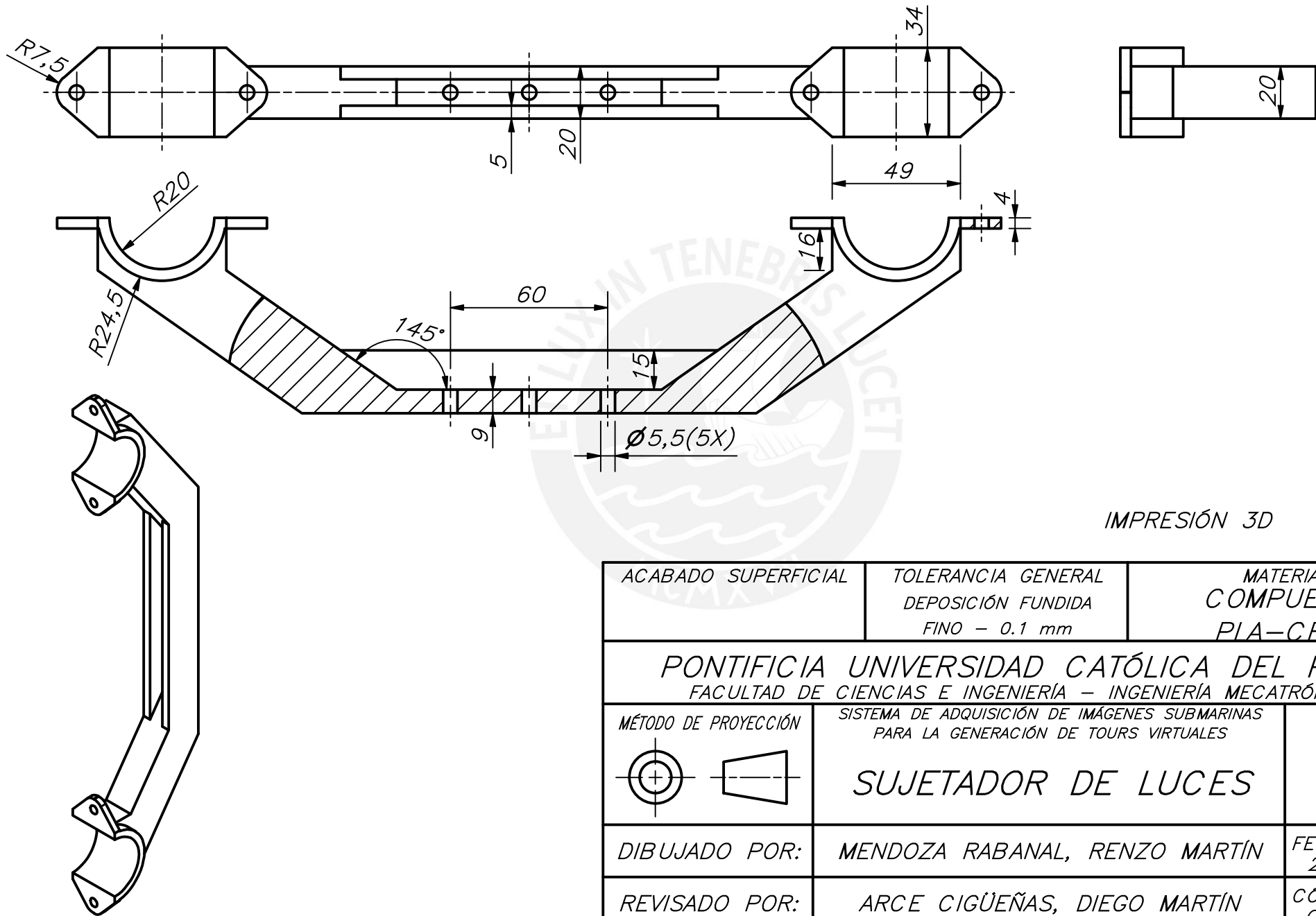
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES	ESCALA
	CUBIERTA DELANTERA	1:2
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G4-D10-A4

DETALLE G
ESCALA 1 : 1

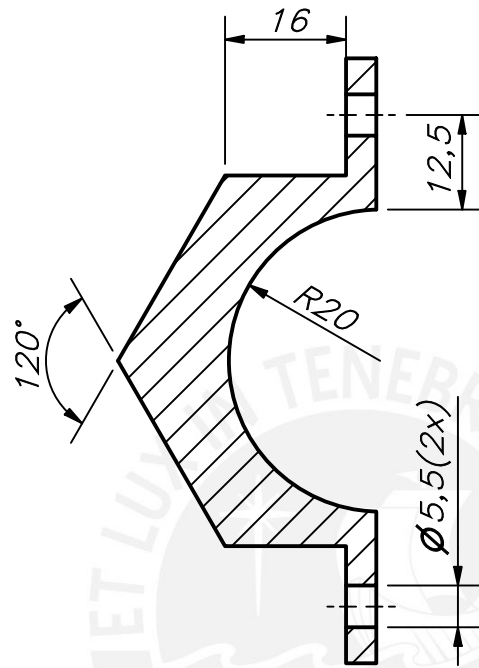
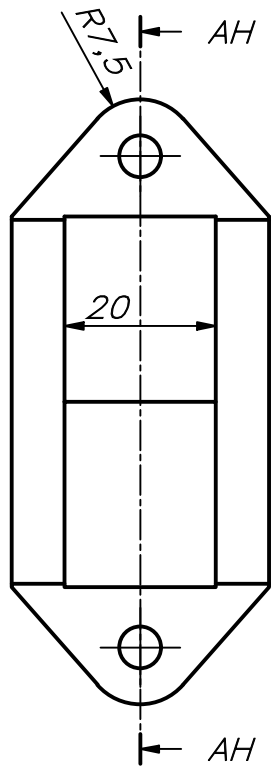


REDONDEOS NO INDICADOS R1 IMPRESIÓN 3D

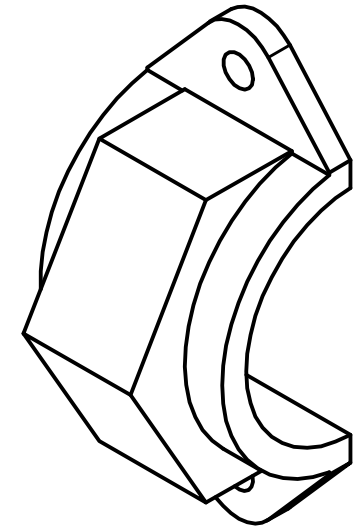
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PLA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES	ESCALA
	CUBIERTA LATERAL	1:2
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G4-D11-A4



ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES	ESCALA
	SUJETADOR DE LUCES	1:2
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G5-D01-A4

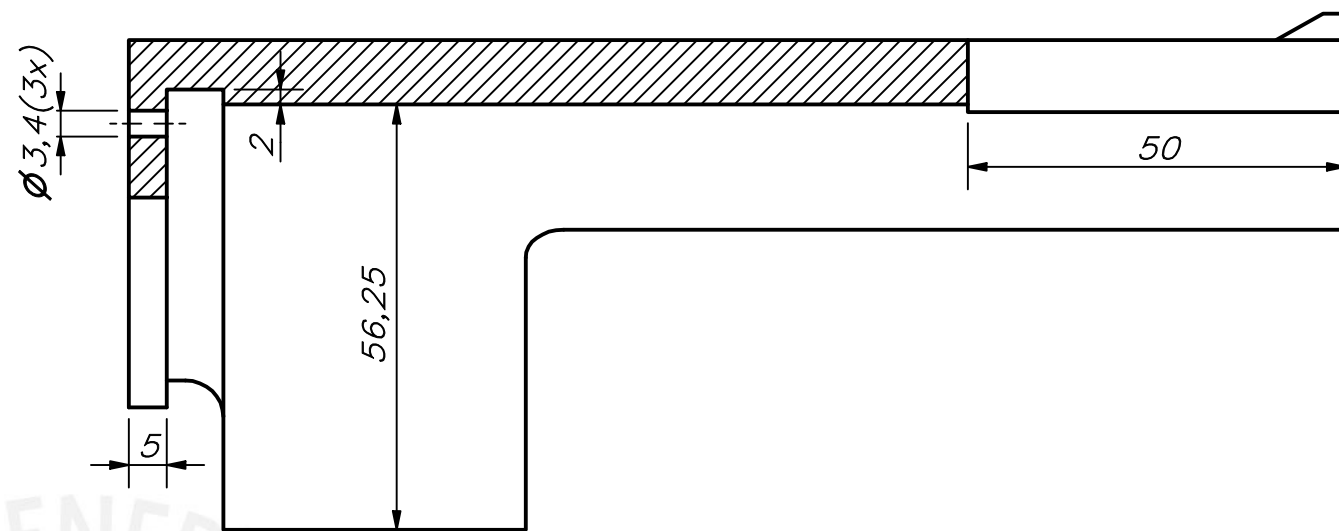
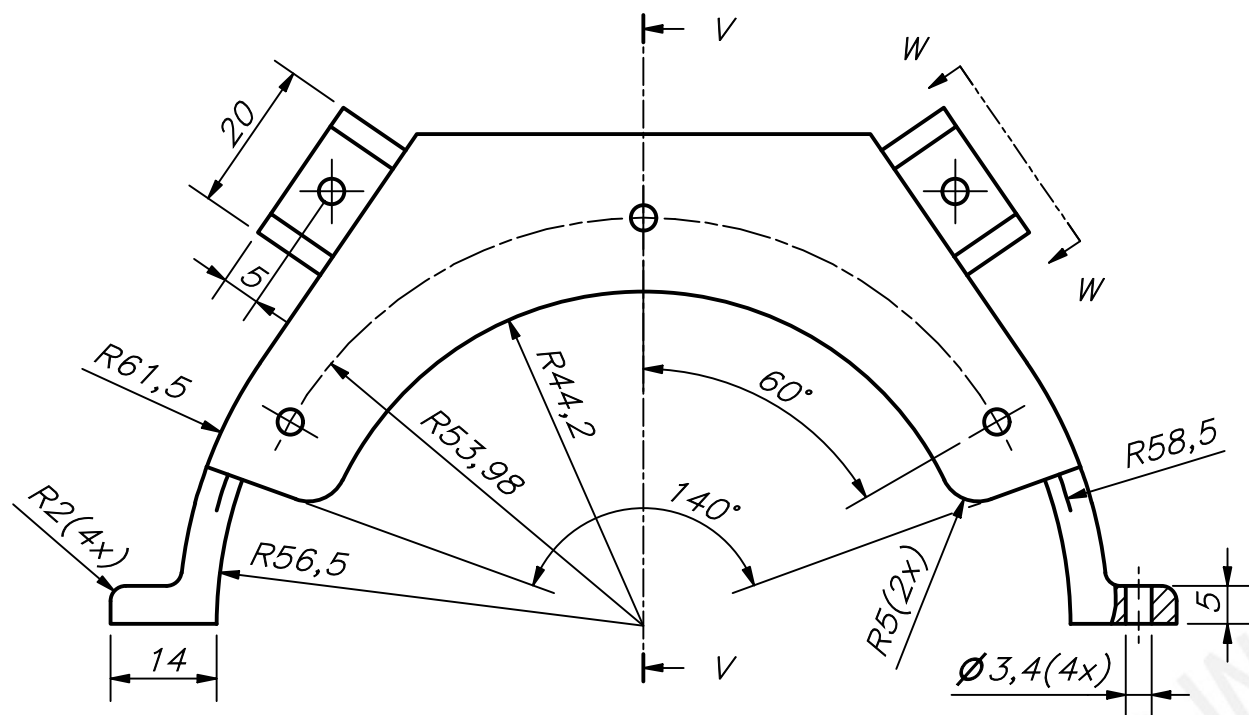


CORTE AH-AH

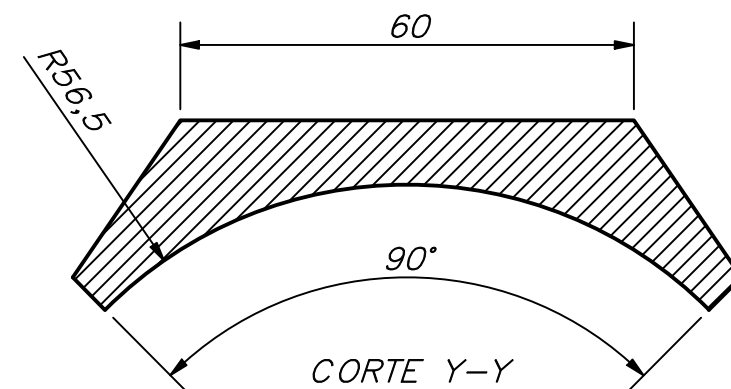


IMPRESIÓN 3D

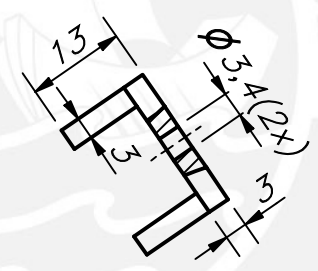
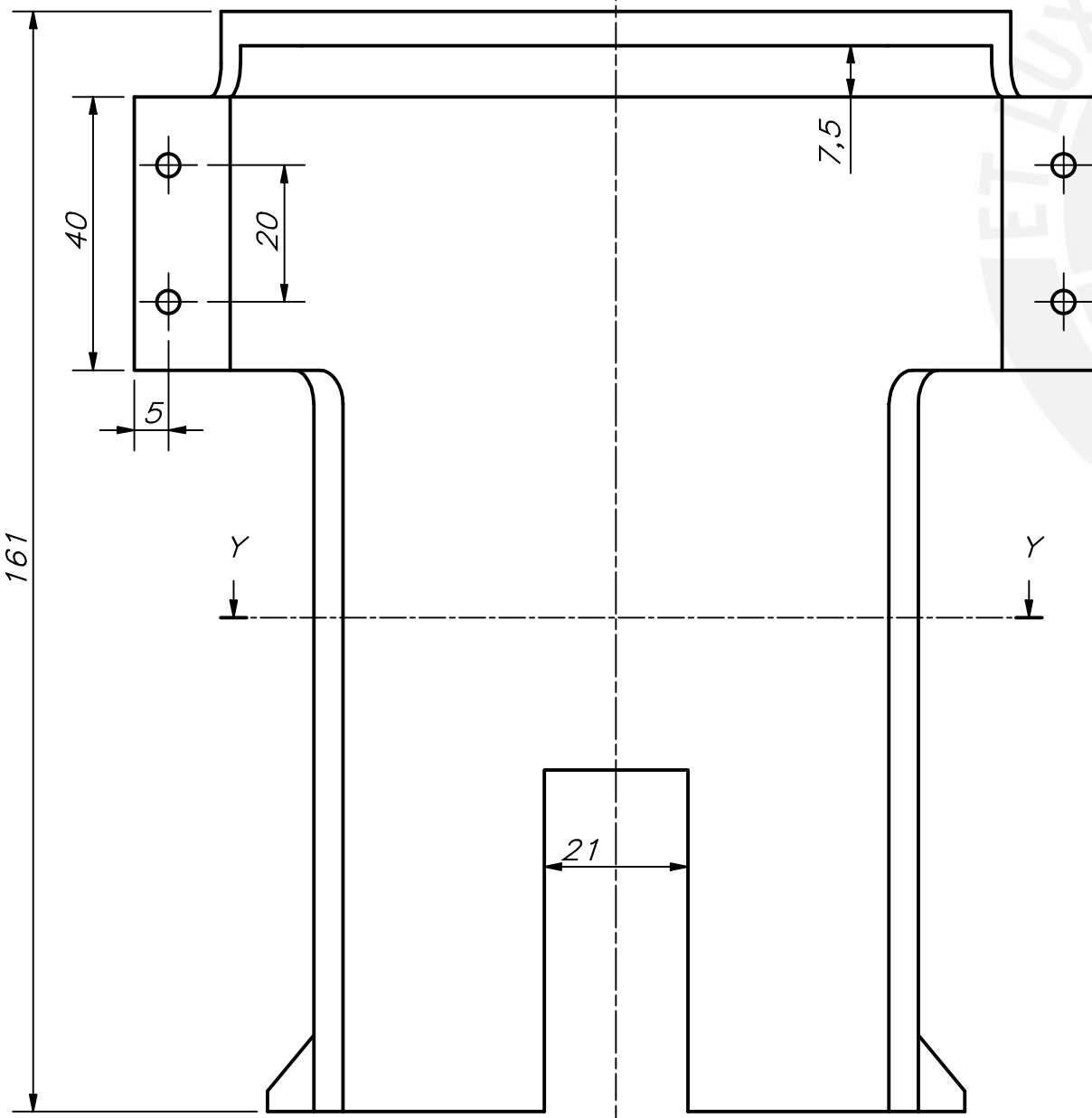
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES COMP. SUJETADOR DE LUCES	ESCALA 1:1
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G5-D02-A4



CORTE V-V



CORTE Y-Y

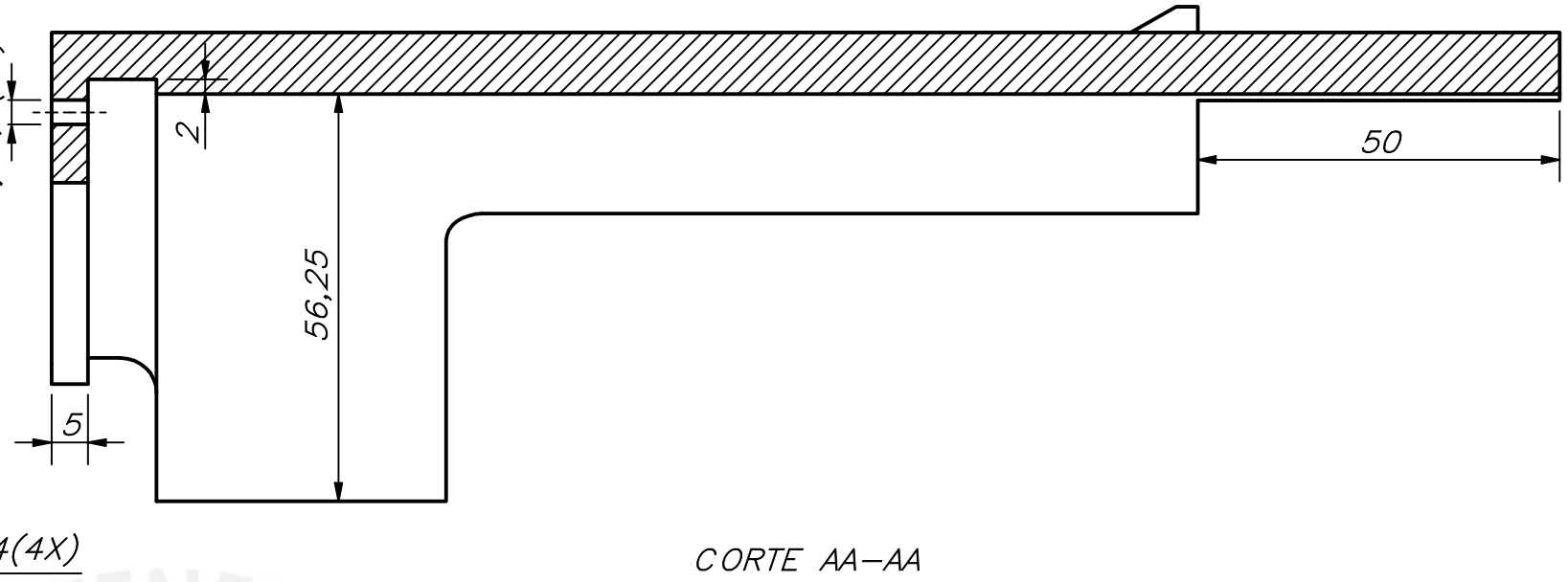
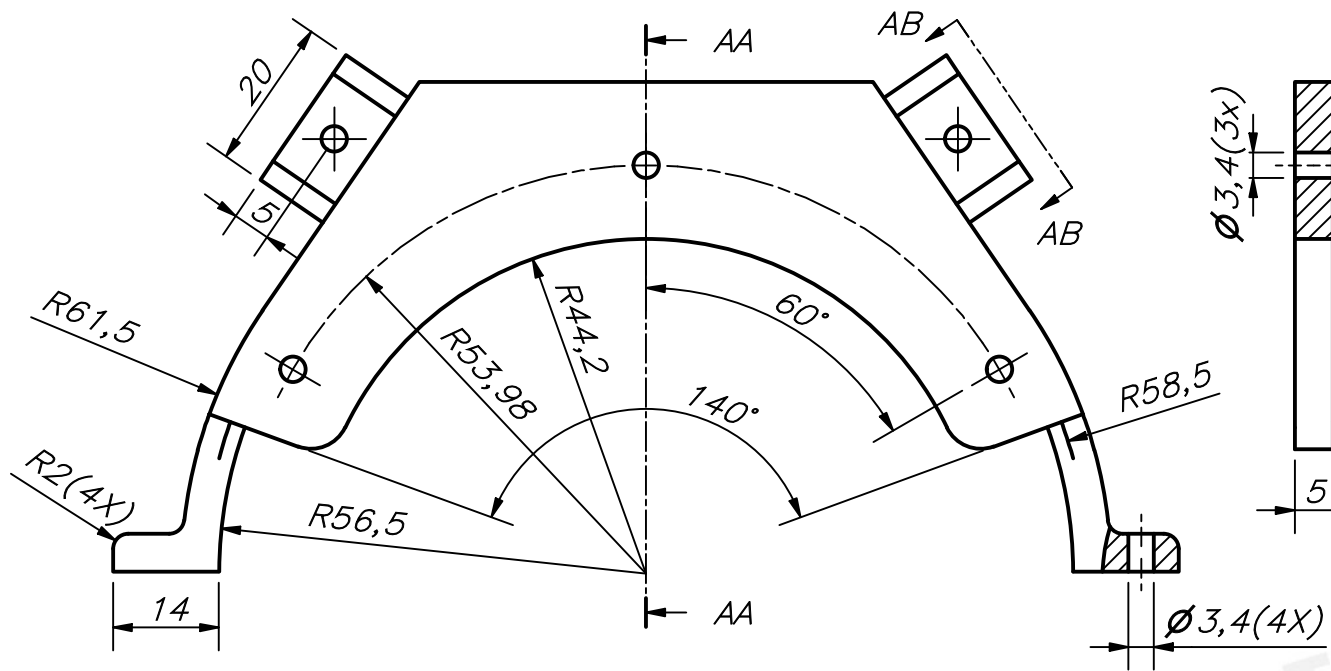


VISTA W-W

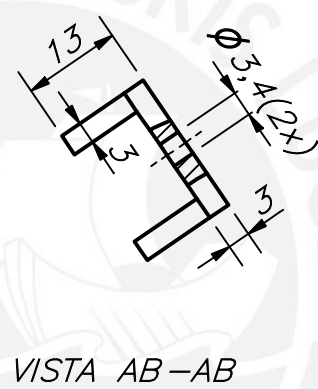
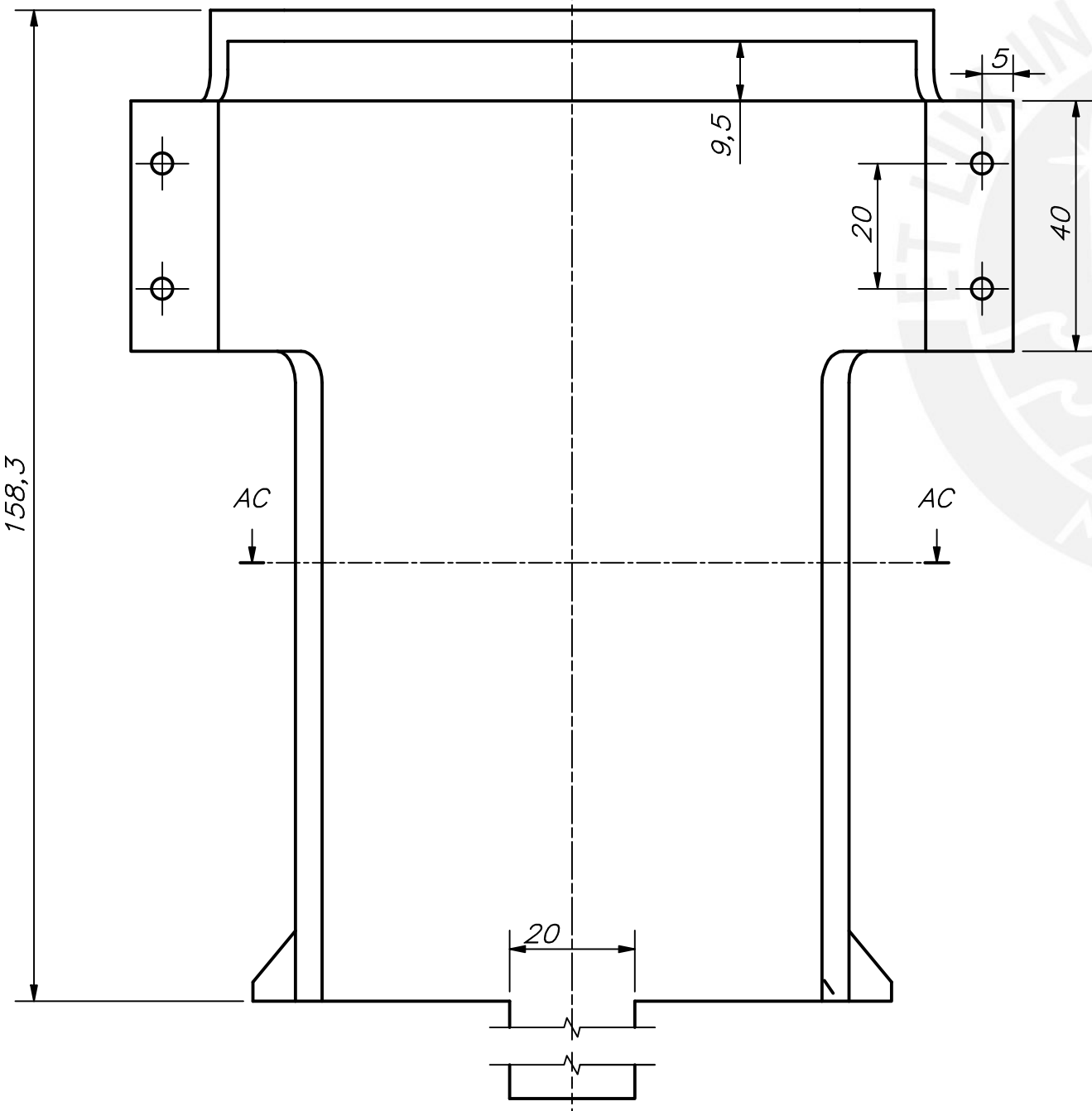
IMPRESIÓN 3D

REDONDEOS NO INDICADOS R5

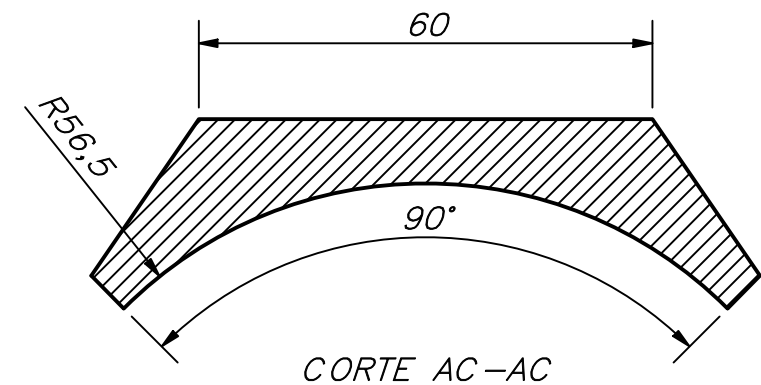
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES SOP. SUP. DELANTERO DE ENC. PRINCIPAL	ESCALA 1:1
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G5-D04-A3



CORTE AA-AA



VISTA AB-AB

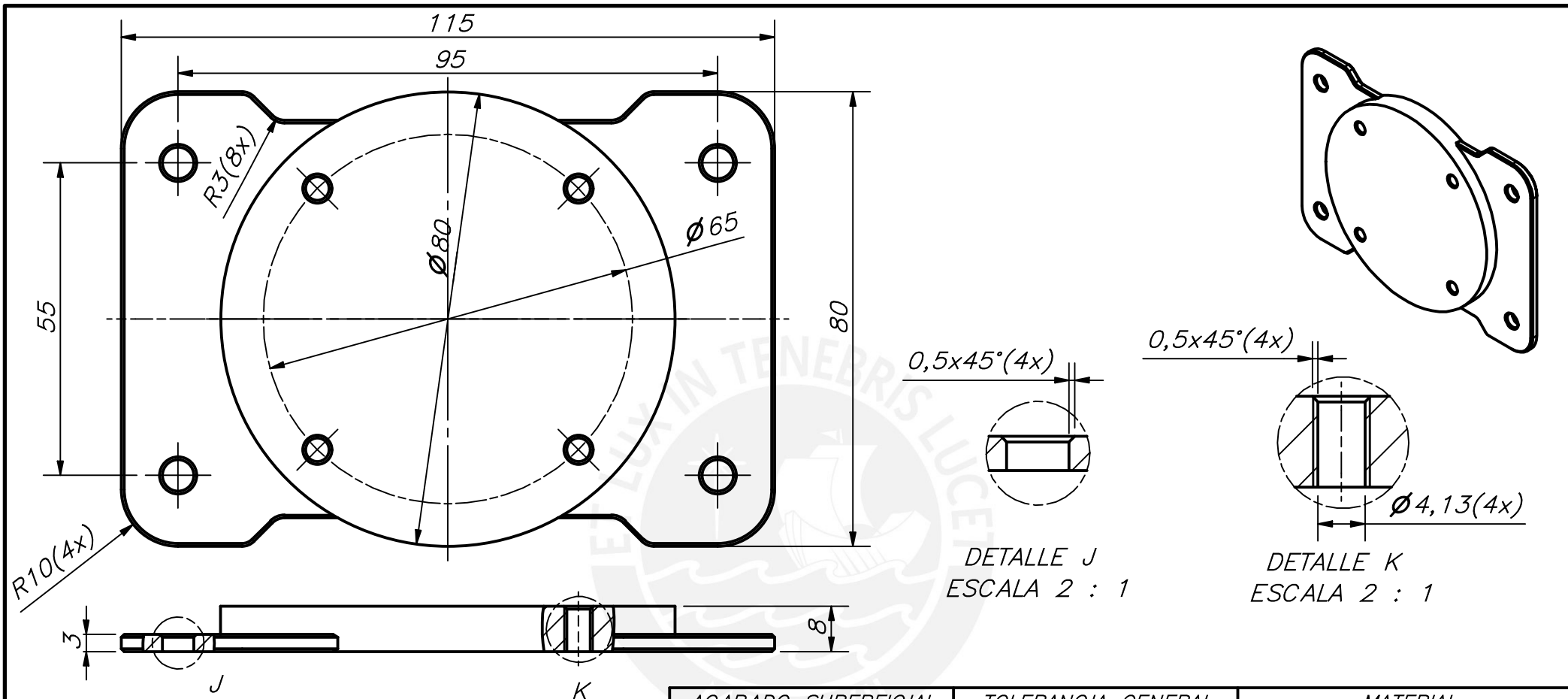


CORTE AC-AC

IMPRESIÓN 3D

REDONDEOS NO INDICADOS R5

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DEPOSICIÓN FUNDIDA FINO - 0.1 mm	MATERIAL COMPUESTO PIA-CFRP
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES SOP. SUP. TRASERO DE ENC. PRINCIPAL	ESCALA 1:1
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G5-D03-A3

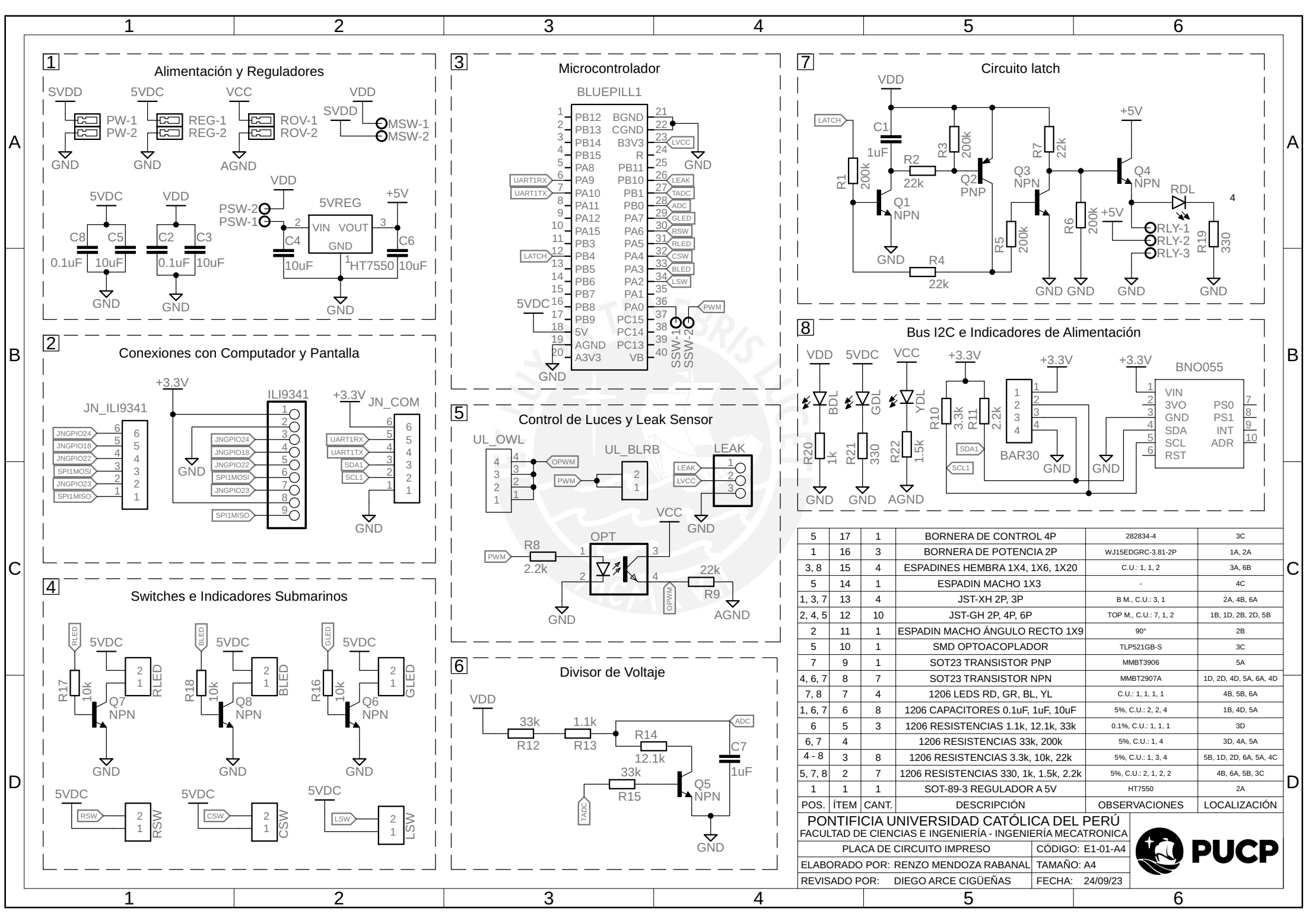


CHAFLANES NO INDICADOS 0,5X45°

ACABADO SUPERFICIAL 6,3/ ▽	TOLERANCIA GENERAL * SEGÚN DIN ISO 2768-1 MEDIO	MATERIAL AA6061-T6
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SUBMARINAS PARA LA GENERACIÓN DE TOURS VIRTUALES	ESCALA 1:1
ACOPLE UNIVERSAL		
DIBUJADO POR:	MENDOZA RABANAL, RENZO MARTÍN	FECHA: 2021.10.12
REVISADO POR:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTÍN	CÓDIGO: G5-D05-A4

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

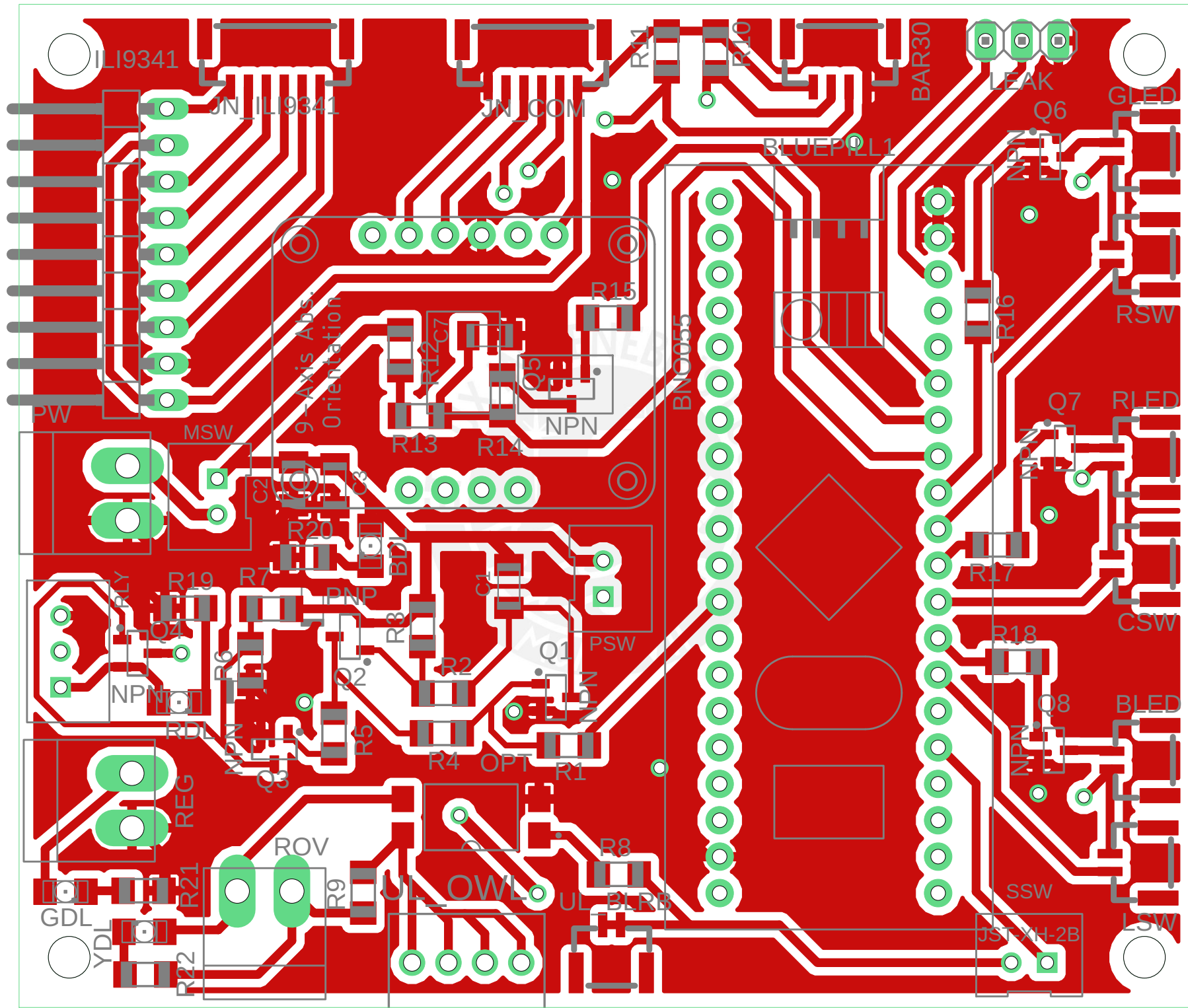
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

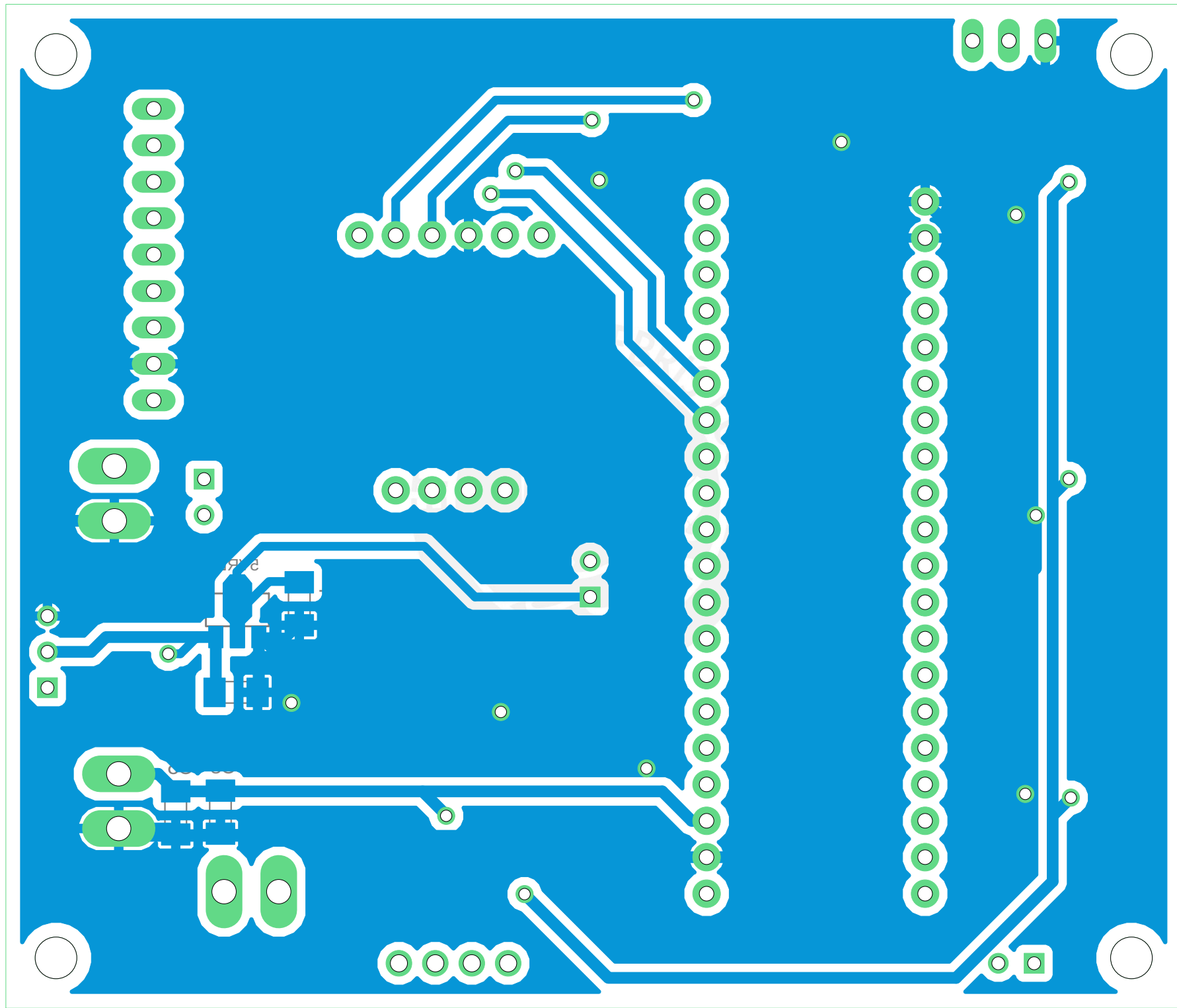


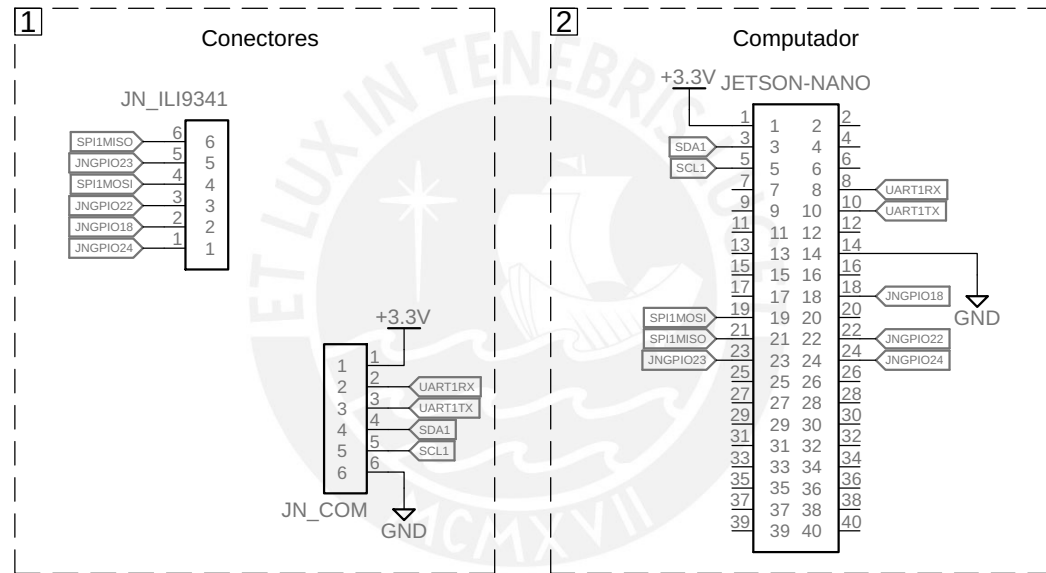
5	17	1	BORNERA DE CONTROL 4P	282834-4	3C
1	16	3	BORNERA DE POTENCIA 2P	WJ15EDGRC-3.81-2P	1A, 2A
3, 8	15	4	ESPADINES HEMBRA 1X4, 1X6, 1X20	C.U.: 1, 1, 2	3A, 6B
5	14	1	ESPADIN MACHO 1X3	-	4C
1, 3, 7	13	4	JST-XH 2P, 3P	B M., C.U.: 3, 1	2A, 4B, 6A
2, 4, 5	12	10	JST-GH 2P, 4P, 6P	TOP M., C.U.: 7, 1, 2	1B, 1D, 2B, 2D, 5B
2	11	1	ESPADIN MACHO ÁNGULO RECTO 1X9	90°	2B
5	10	1	SMD OPTOACOPADOR	TLP521GB-S	3C
7	9	1	SOT23 TRANSISTOR PNP	MMBT3906	5A
4, 6, 7	8	7	SOT23 TRANSISTOR NPN	MMBT2907A	1D, 2D, 4D, 5A, 6A, 4D
7, 8	7	4	1206 LEDS RD, GR, BL, YL	C.U.: 1, 1, 1, 1	4B, 5B, 6A
1, 6, 7	6	8	1206 CAPACITORES 0.1uF, 1uF, 10uF	5%, C.U.: 2, 2, 4	1B, 4D, 5A
6	5	3	1206 RESISTENCIAS 1.1k, 12.1k, 33k	0.1%, C.U.: 1, 1, 1	3D
6, 7	4	4	1206 RESISTENCIAS 33k, 200k	5%, C.U.: 1, 4	3D, 4A, 5A
4 - 8	3	8	1206 RESISTENCIAS 3.3k, 10k, 22k	5%, C.U.: 1, 3, 4	5B, 1D, 2D, 6A, 5A, 4C
5, 7, 8	2	7	1206 RESISTENCIAS 330, 1k, 1.5k, 2.2k	5%, C.U.: 2, 1, 2, 2	4B, 6A, 5B, 3C
1	1	1	SOT-89-3 REGULADOR A 5V	HT7550	2A

POS.	ÍTEM	CANT.	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES	LOCALIZACIÓN
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ					
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRONICA					
PLACA DE CIRCUITO IMPRESO			CÓDIGO: E1-01-A4		
ELABORADO POR: RENZO MENDOZA RABANAL			TAMAÑO: A4		
REVISADO POR: DIEGO ARCE CIGÜEÑAS			FECHA: 24/09/23		



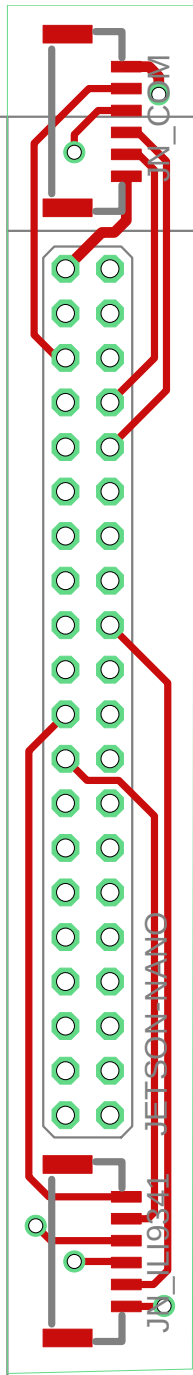


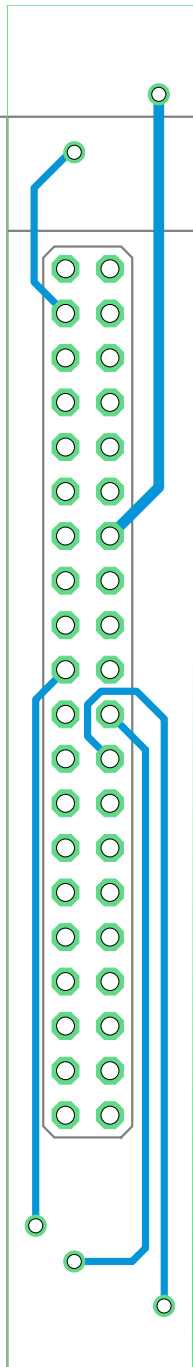


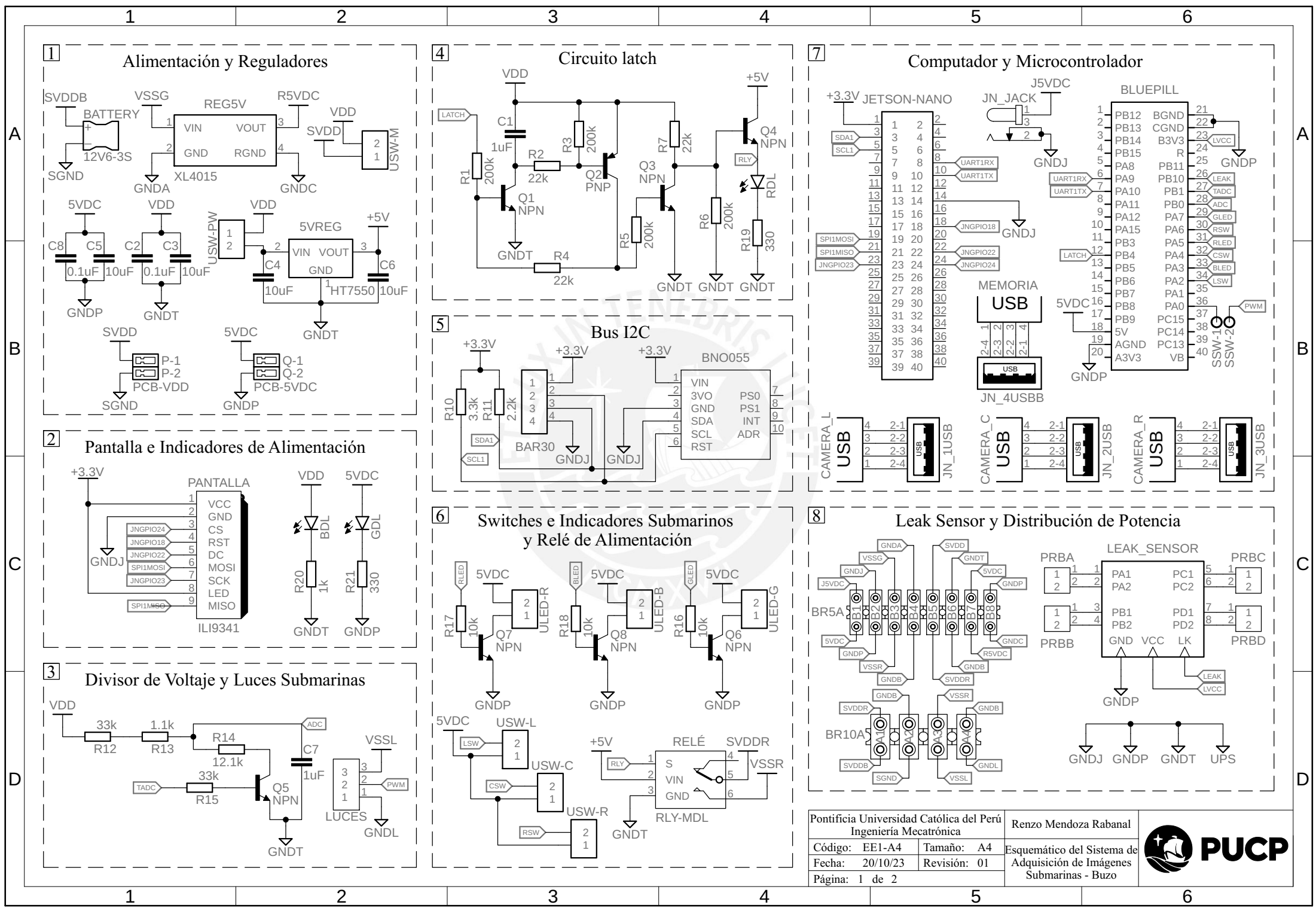


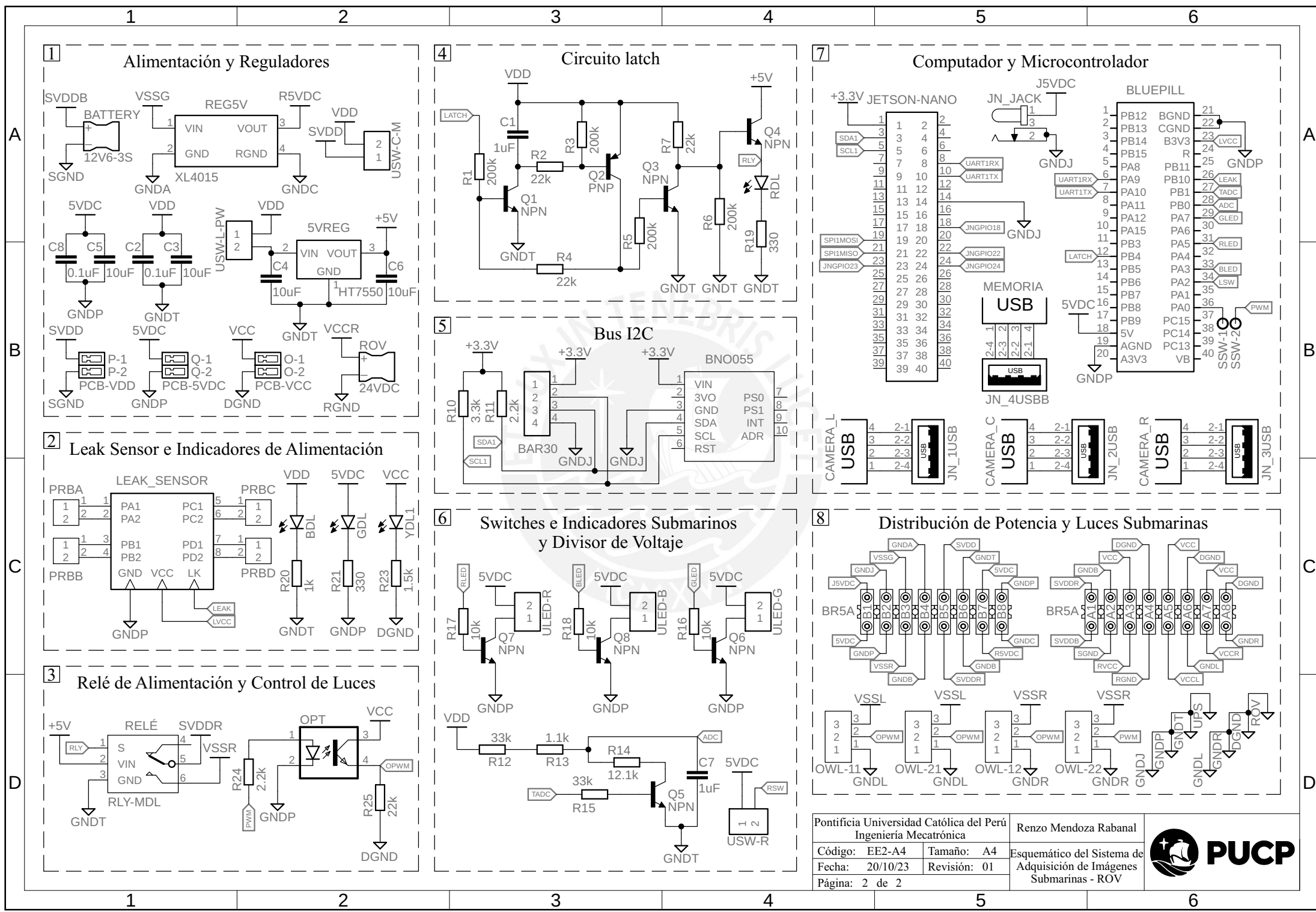
2	2	1	ESPADINES HEMBRA 2X20	BOTTOM LAYER	4B
1	1	2	JST-GH 6P	TOP M.	3B, 3C
POS.	ÍTEM	CANT.	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES	LOCALIZACIÓN
			PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ		
			FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRONICA		
			SHIELD JETSON NANO		CÓDIGO: E1-02-A4
			ELABORADO POR: RENZO MENDOZA RABANAL		TAMAÑO: A4
			REVISADO POR: DIEGO ARCE CIGÜEÑAS		FECHA: 24/09/23











1

2

3

4

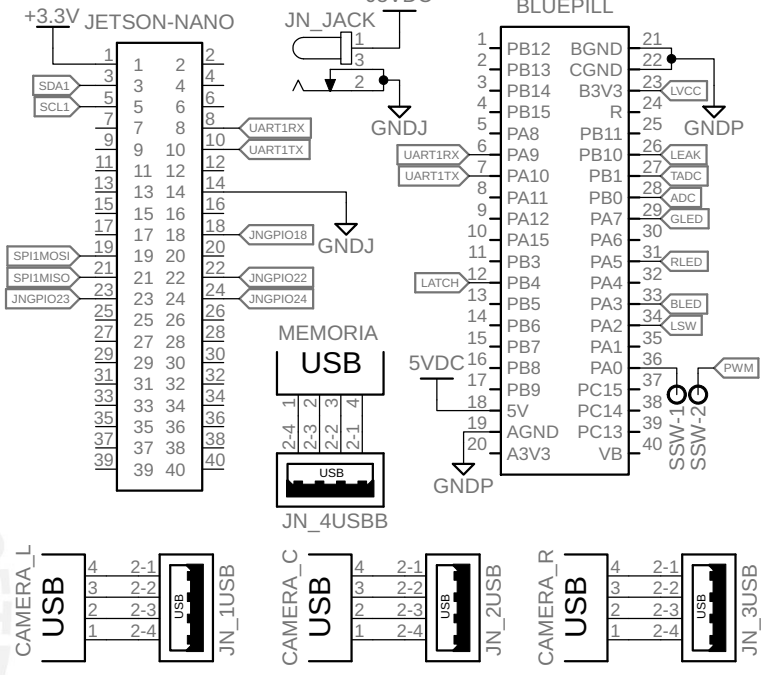
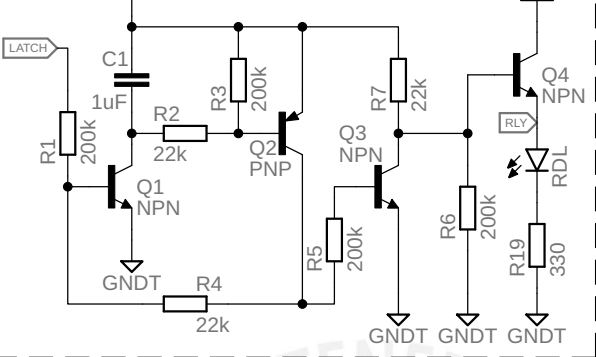
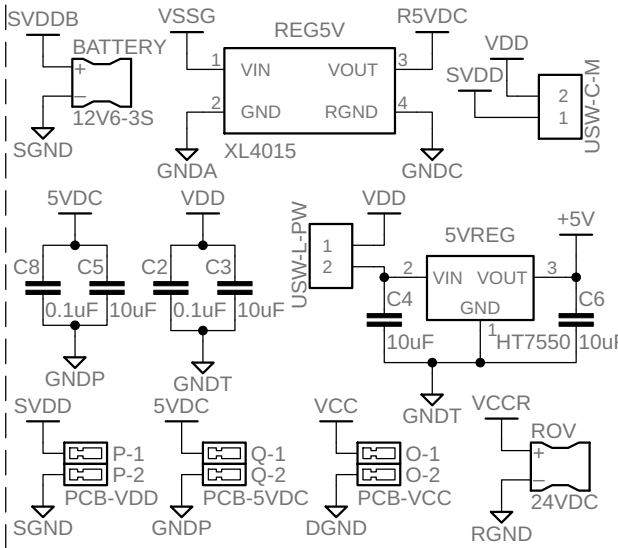
5

6

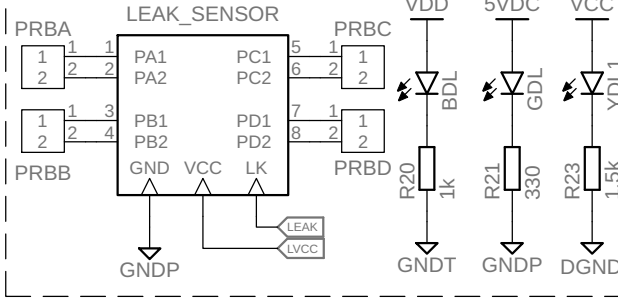
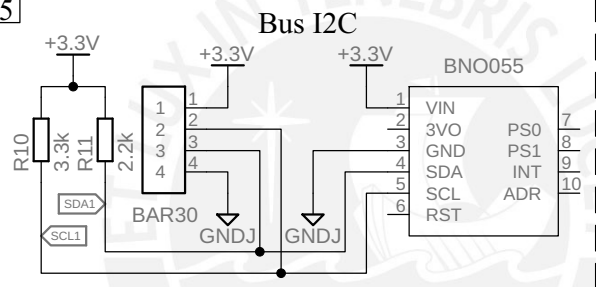
1 Alimentación y Reguladores

4 Circuito latch

7 Computador y Microcontrolador



2 Leak Sensor e Indicadores de Alimentación



6 Switches e Indicadores Submarinos y Divisor de Voltaje

8 Distribución de Potencia y Luces Submarinas

3 Relé de Alimentación y Control de Luces

