

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica



**Diseño de un módulo de grabación para un sistema *BRUVS* personalizado a las
necesidades del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica
con el grado académico de Licenciatura**

Eduardo Lang Álvarez

Cartago, junio de 2021



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, Junio 2021



Eduardo Lang Álvarez

Céd: 9-0108-0139

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

El profesor asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica para ser defendido ante el jurado evaluador, como requisito final para aprobar el curso Proyecto Final de Graduación y optar así por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura.

Estudiante: Eduardo Lang Álvarez

Proyecto: Diseño de un módulo de grabación para un sistema BRUVS personalizado a las necesidades del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología.

**JUAN CARLOS
BRENES TORRES
(FIRMA)**

Firmado digitalmente
por JUAN CARLOS
BRENES TORRES
(FIRMA)
Fecha: 2021.06.16
18:21:41 -06'00'

MSc. -Ing. Juan Carlos Brenes Torres

Asesor

Cartago, 22 de junio 2021

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

Proyecto final de graduación defendido ante el presente jurado evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, según lo establecido por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Eduardo Lang Álvarez

Proyecto: Diseño de un módulo de grabación para un sistema BRUVS personalizado a las necesidades del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología.

Miembros del jurado evaluador



ANA GABRIELA ORTIZ
LEON (FIRMA)
2021.06.24 19:57:49 -06'00'

ROGER STUART
MELENDEZ POLTRONIERI
(FIRMA)

Firmado digitalmente por ROGER
STUART MELENDEZ POLTRONIERI
(FIRMA)
Fecha: 2021.06.24 15:19:14 -06'00'

Dra. -Ing. Gabriela Ortiz León

Jurado

Ing. Roger Meléndez Poltronieri

Jurado

ANA MARIA MURILLO MORGAN (FIRMA)
Firmado digitalmente por ANA
MARIA MURILLO MORGAN
(FIRMA)
Fecha: 2021.06.23 08:10:45 -06'00'

Ing. Ana María Murillo Morgan

Jurado

Los miembros de este jurado dan fe de que el presente proyecto final de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 22 de junio 2021

Resumen

El Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR) tiene como objetivo la investigación y documentación de los cuerpos de agua de Costa Rica. Para realizar esto se apoyan en una variedad de herramientas, incluyendo los *Baited Remote Underwater Video Stations*. Estas estaciones permiten la grabación de la fauna marina sin ser tan intrusivos como otros métodos. Sin embargo, este sistema presenta una limitante de profundidad que limita el alcance de las investigaciones que se pueden realizar.

Para expandir las aplicaciones de un *BRUVS*, se busca diseñar un sistema capaz de operar a mayores profundidades que los sistemas actuales. En este documento se presenta una aproximación inicial al problema, con el objetivo de diseñar un sistema capaz de operar a 10 metros de profundidad. Se diseña una carcasa capaz de soportar estas profundidades, y un sistema electrónico capaz de capturar video basado en una placa computadora. Adicionalmente se integra la función de lectura de variables ambientales con estampa de tiempo.

El resultado es un sistema capaz de grabar y tomar datos del entorno subacuático, que aprueba el 100% de las pruebas de validación diseñadas. Se obtiene exitosamente un archivo de grabación y una lista de variables ambientales para cada prueba.

Palabras clave: BRUVS, Carcasa hermética, Python, Raspberry Pi

Abstract

The Center for Research in Marine Sciences and Limnology (CIMAR) aims to research and document the flora and fauna in the bodies of water in Costa Rica. To do this they rely on a variety of tools, including *Baited Remote Underwater Video Stations*. These stations allow the recording of marine fauna without being as intrusive as other methods. However, this system presents a depth limitation that limits the scope of the investigations that can be carried out.

To expand the applications of a *BRUVS*, the aim is to design a system capable of operating at greater depths than current systems. This document presents an initial approach to the problem, with the aim of designing a system capable of operating at a depth of 10 meters. A housing capable of withstanding these depths is designed, and an electronic system capable of capturing video based on a single board computer. A function of reading environmental variables with time stamp is also integrated.

The result is a system capable of recording and taking data from the underwater environment, which passes 100% of the designed validation tests. A recording file and a list of environmental variables are successfully obtained for each test.

Key words: BRUVS, Watertight Housing, Python, Raspberry Pi

Dedicatoria

Le dedico este proyecto a mis papás, Alvaro y Giannina, los dos ingenieros que más admiro. Gracias por darme todas las herramientas que he usado para llegar donde estoy. Este proyecto es de ustedes también.

A mi hermana Karina por siempre estar ahí para ayudarme con lo que fuera necesario.

También a mis amigos que me ayudaron a crecer tanto personal como académicamente. No estaría aquí si no fuera por ustedes.

Agradecimiento

Agradezco a mi asesor Juan Carlos Brenes por ser un profesor inspirador, reforzando el pensamiento creativo y crítico en sus estudiantes. Gracias por brindar su tiempo y conocimiento para ayudarme a completar la carrera y este proyecto.

Agradezco también a Mario Espinoza, y los investigadores en el CIMAR que hicieron posible la concepción y desarrollo de este proyecto. Agradezco la oportunidad de emprender un proyecto emocionante con la posibilidad de tener un impacto.

Por último, agradezco a todos los profesores de la carrera y del Tecnológico de Costa Rica, que me han formado a través de todos estos años.

Tabla de contenidos

<u>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1 CONTEXTO	1
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2.1 SÍNTESIS DEL PROBLEMA.....	3
1.3 ANTECEDENTES	3
1.4 OBJETIVOS	4
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.5 ESTRUCTURA DE DOCUMENTO	5
<u>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO</u>	6
2.1 BRUVS	6
2.2 SINGLE BOARD COMPUTER	7
2.3 SENSORES MEMS	8
2.4 NORMA DE VALIDACIÓN	9
2.5 RELACIÓN PRESIÓN-PROFUNDIDAD	11
<u>CAPÍTULO 3: DESARROLLO METODOLÓGICO</u>	12
3.1 METODOLOGÍA	12
3.2 IDENTIFICACIÓN DE NECESIDADES DEL CLIENTE	14
3.3 ESTABLECIMIENTO DE VALORES OBJETIVO	15
3.4 GENERACIÓN DE CONCEPTOS	18
3.5 BÚSQUEDA DE CONCEPTOS	19
3.6 EVALUACIÓN DE CONCEPTOS	21
<u>CAPÍTULO 4: DISEÑO DE SOLUCIÓN</u>	22

4.1 DISEÑO MECÁNICO.....	22
4.1.1 CARCASA	22
4.1.2 SELECCIÓN DE PARTES	25
4.1.3 PEGAMENTO.....	28
4.1.4 SELLO DE ROSCA	29
4.1.5 MODIFICACIÓN DE PARTES	32
4.1.6 CÁLCULOS DE PROFUNDIDAD	34
4.1.7 ENCAPSULAMIENTO DEL SENSOR	37
4.2 DISEÑO ELECTRÓNICO	40
4.2.1 SELECCIÓN DEL PROCESADOR DE INFORMACIÓN.....	40
4.2.2 SELECCIÓN DE DISPOSITIVO DE GRABACIÓN	42
4.2.3 SELECCIÓN DE ILUMINACIÓN AUXILIAR.....	44
4.2.4 SELECCIÓN DE SENSORES DE VARIABLES	46
4.2.5 PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA	48
4.2.6 ALMACENAMIENTO Y ALIMENTACIÓN DE ENERGÍA	52
4.3 INTEGRACIÓN Y DISEÑO DE PROTOTIPO	54
4.3.1 INTEGRACIÓN DE SISTEMAS	54
4.3.2 DISEÑO FINAL.....	55
4.4 DISEÑO DE PRUEBAS DE CONCEPTO	58
4.4.1 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO ELECTRÓNICO.....	58
4.4.2 PRUEBA DE HERMETICIDAD DE CARCASA.....	59
4.4.3 PRUEBA COMPLETA DE SISTEMA ELECTRÓNICO Y CARCASA	60
<u>CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</u>	<u>61</u>
5.1 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO ELECTRÓNICO	61
5.1.1 RESULTADOS	61
5.1.2 ANÁLISIS.....	62
5.2 PRUEBA DE HERMETICIDAD DE CARCASA.....	64
5.2.1 RESULTADOS	64
5.2.2 ANÁLISIS.....	65
5.3 PRUEBA DE SISTEMA ELECTRÓNICO Y CARCASA	66
5.3.1 RESULTADOS	66

5.3.2 ANÁLISIS	68
5.4 ESPECIFICACIONES FINALES.....	74
<u>CAPÍTULO 6: ANÁLISIS ECONÓMICO</u>	<u>77</u>
<u>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	<u>82</u>
7.1 CONCLUSIONES.....	82
7.2 RECOMENDACIONES.....	83
<u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>84</u>
<u>APÉNDICES</u>	<u>87</u>
APÉNDICE A. TRANSCRIPCIONES DE ENTREVISTAS	87
APÉNDICE B. ESQUEMÁTICA DE CONEXIÓN	90
APÉNDICE C. PLANOS DE PIEZAS NO ESTÁNDAR.....	91

Lista de figuras

Figura 1.1 Estructura BRUVS utilizada en la Isla del Coco. Fuente: CIMAR UCR	2
Figura 2.1 BRUVS listo para ser colocado en un punto de muestreo. Fuente: CIMAR UCR	7
Figura 2.2 Raspberry Pi 3B+. Fuente: Raspberry Pi Foundation	8
Figura 2.3 Diagrama de sensor de presión MEMS. [9]	9
Figura 2.4 Relación Presión - Profundidad.....	11
Figura 3.1 Etapas de proceso para el desarrollo de un producto. [5].....	12
Figura 3.2 Descomposición funcional para un sistema BRUVS	18
Figura 4.1 Boceto para pieza de ventana de acrílico	27
Figura 4.2 Vista en explosionado del ensamble de la carcasa	28
Figura 4.3 Perfil de anillo Quad [18].....	30
Figura 4.4 Propuesta de instalación para anillo Quad	31
Figura 4.5 Modificaciones necesarias a la reducción	33
Figura 4.6 Modificaciones necesarias al tapón de acople de limpieza	34
Figura 4.7 Corte transversal de un sistema penetrador [21]	37
Figura 4.8 Corte transversal del sistema de encapsulamiento directo de sensores.....	38
Figura 4.9 Encapsulamiento del sensor	39
Figura 4.10 Esquema de conexión para LEDs.....	46
Figura 4.11 Divisor de tensión implementado.....	48
Figura 4.12 Diagrama de flujo de código	49
Figura 4.13 Esquema para conexión de interruptor y LED de estatus	50
Figura 4.14 Curva de brillo contra valor de iluminación de LEDs.....	51
Figura 4.15 Vista explosionada del ensamblaje	54
Figura 4.16 Modelo del ensamblaje.....	55
Figura 4.17 Modelo de ensamblaje final del prototipo	56
Figura 5.1 Temperatura interna medida durante pruebas de sistema electrónico.....	62
Figura 5.2 Duración estimada para el consumo energético de cada prueba	63
Figura 5.3 Resultados de profundidad calculados para las pruebas de inmersión.....	67
Figura 5.4 Resultados de temperatura obtenidos para las pruebas de inmersión	68
Figura 5.5 Imagen de dispositivo durante prueba de validación 1	69
Figura 5.6 Imagen capturada por el dispositivo en prueba de validación 1	69
Figura 5.7 Captura de grabación durante prueba de validación 3	70
Figura 5.8 Resultados de profundidad calculados para la prueba de inmersión 3.....	71

Figura 5.9 Resultados de temperatura obtenidos para la prueba de inmersión 3	72
Figura 5.10 Componentes de sistema mecánico.....	75
Figura 5.11 Componentes de sistema electrónico	75
Figura 5.12 Prototipo final ensamblado.....	76

Lista de tablas

Tabla 3.1 Enunciados de necesidades del cliente	15
Tabla 3.2 Lista de métricas	16
Tabla 3.3 Matriz de correspondencia de necesidades-métricas	16
Tabla 3.4 Lista de especificaciones objetivo	17
Tabla 3.5 Resultados de búsqueda de conceptos	20
Tabla 4.1 Matriz de evaluación para la forma de la carcasa	22
Tabla 4.2 Tabla de comparación para distintos materiales	23
Tabla 4.3 Matriz de evaluación para material de carcasa	24
Tabla 4.4 Matriz de evaluación para material de ventana	24
Tabla 4.5 Lista de accesorios PVC SCH 80 utilizados en el diseño de la carcasa	26
Tabla 4.6 Presión máxima permisible para distintos componentes	35
Tabla 4.7 Profundidad máxima teórica para distintos componentes	36
Tabla 4.8 Características de varios controladores candidatos	41
Tabla 4.9 Matriz de evaluación para los controladores seleccionados	42
Tabla 4.10 Características de distintos dispositivos de grabación	43
Tabla 4.11 Matriz de evaluación para dispositivos de grabación	43
Tabla 4.12 Características de sistemas de iluminación	44
Tabla 4.13 Matriz de evaluación para el sistema de iluminación	45
Tabla 4.14 Comparación de características de baterías	52
Tabla 5.1 Características de pruebas realizadas a subsistema electrónico	61
Tabla 5.2 Características de pruebas realizadas a carcasa	65
Tabla 5.3 Características de pruebas finales realizadas	66
Tabla 5.4 Lista de especificaciones finales	74
Tabla 6.1 Valores utilizados para el cálculo de depreciación	77
Tabla 6.2 Costo aproximado de estudiante	78
Tabla 6.3 Lista y costo de componentes utilizados en prototipo	80
Tabla 6.4 Costo total de desarrollo del proyecto	81

Lista de abreviaciones

BRUVS: Baited Remote Underwater Video Station

CIMAR: Centro de Investigación de Ciencias del Mar y Limnología

SBC: Single Board Computer

ADC: Analog to Digital Converter

LED: Light Emitting Diode

Capítulo 1: Introducción

1.1 Contexto

La Universidad de Costa Rica estableció el Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR) en 1978. Desde entonces esta entidad se ha enfocado en buscar, a través de información científica, la ordenación de todos los cuerpos de agua del país, desde las aguas dulces a las zonas costeras y oceánicas [1]. En este centro de investigación se trabaja con el objetivo de descubrir y evidenciar los patrones de comportamientos de distintas especies marinas que se encuentran en nuestro país. Distintos investigadores se han enfocado en aspectos diferentes de la vida marina, como es el caso del investigador Mario Espinoza, PhD, y su enfoque en los *elasmobranquios* (familia de tiburones y mantarrayas).

Este centro de investigación está basado en el campus central de la Universidad de Costa Rica, pero para realizar los muestreos de especies se hacen expediciones a distintas áreas del país. Estas se extienden desde el Pacífico Norte del país hasta islas en el sur como la Isla del Caño, e incluso se llega hasta el territorio de la Isla del Coco. Las investigaciones varían según el objetivo que se tenga, pero generalmente consisten en muestreos de especies marítimas y el cambio en cantidades con el tiempo. Se suele además tomar información del ambiente que podría indicar algún motivo para estos números.

El investigador Sergio Madrigal, graduado de Biología en la UCR, menciona en la entrevista que una herramienta de suma importancia para estos muestreos es un *Baited Remote Underwater Video Station*, o *BRUVS*, ilustrado en la Figura 1.1. Estas herramientas consisten en estructuras metálicas de distintas formas, que varían según el sitio donde se vayan a colocar. Sujetados a esta estructura se tienen cámaras y sensores, para obtener videos de la fauna y mediciones de variables de la zona. El uso de estos BRUVS tiene varias ventajas respecto al segundo método de muestreo que consiste en bucear. Primero, se requiere menos personal capacitado, ya que para bucear se requieren horas de entrenamiento y práctica para obtener una licencia. Además, el equipo para buceo suele ser más costoso que una estación BRUVS. También

se debe considerar que, durante las inmersiones, se extrae solamente una hora de información por cada hora de buceo. Madrigal mencionó que se pueden colocar varios BRUVS en distintos puntos y dejarlos grabando, de forma que se obtienen varias horas de información por cada hora transcurrida. De esta forma, se puede reducir el tiempo en giras del personal investigador sin sacrificar la cantidad de información.



Figura 1.1 Estructura BRUVS utilizada en la Isla del Coco. Fuente: CIMAR UCR

1.2 Descripción del problema

Según Madrigal, se estima que un 99% de la información que se ha recopilado en la rama de la biología marina ha sido por encima de los 50 metros de profundidad. Esto se debe a las limitaciones tanto de seguridad como de equipo. Otro investigador, Isaac Chaves, agrega que las inmersiones para los buzos no suelen sobrepasar los 40 metros de profundidad. Además, el equipo que se utiliza regularmente tiene un límite de 35 a 40 metros de profundidad.

El objetivo principal del CIMAR consiste en la investigación y la indagación del estado de los cuerpos acuáticos de Costa Rica. A lo largo de los años se han hecho convenios de cooperación con muchas instituciones internacionales, que suelen poseer mayor cantidad de recursos de inversión. Esto ha limitado a los investigadores cuya única opción de indagar a las profundidades del océano es de la mano de entidades con un mayor poder adquisitivo. Tanto estudiantes como

investigadores adjuntos se beneficiarían de dispositivos capaces de tomar datos a mayores profundidades. Ya que las opciones comerciales de dispositivos de recolección de información de alta profundidad son sumamente costosas, llega a ser prohibitivo en algunos casos. La posibilidad de adquirir dispositivos a un precio accesible, capaces de llegar a altas profundidades, abre las puertas a nuevos temas de investigación enfocados en la profundidad que pueden potenciar el alcance de información adquirida en el CIMAR.

1.2.1 Síntesis del problema

Se puede sintetizar el problema en el CIMAR como la falta de acceso a equipo de investigación con la capacidad de llegar a altas profundidades subacuáticas. El equipo existente posee un muy alto costo y es difícil de conseguir.

1.3 Antecedentes

Actualmente en el CIMAR se utilizan BRUVS con dos componentes de toma de datos. Uno de ellos es una cámara GoPro, con capacidad de grabación de aproximadamente una hora. El límite de profundidad de esta cámara es de 40 metros según el fabricante. El segundo componente consiste en un sensor de temperatura HOBO U22 de la empresa OnSet. Este tiene un límite de profundidad de 120 metros [6].

En este proyecto se busca explorar las posibilidades de desarrollo de un dispositivo con la capacidad de integrar la grabación de video y la toma de datos en un único sistema. Con esto se busca reducir la complejidad y el costo de cada sistema BRUVS, permitiendo extender el alcance de las investigaciones realizadas por el CIMAR.

Como una aproximación inicial a este problema, se creó un prototipo de un sistema BRUVS, abarcando el diseño mecánico y electrónico, que integra el sistema de grabación y el sistema de toma de datos. Para el desarrollo de este primer prototipo se estableció una profundidad objetivo de 10 metros, de forma que sea un objetivo alcanzable en el plazo de tiempo estipulado.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Diseñar un módulo de grabación para un sistema *BRUVS* (Baited Remote Underwater Video Station) personalizado a las necesidades del CIMAR.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Diagnosticar los procesos actuales de tomas de datos con los sistemas BRUVS existentes.
2. Desarrollar un sistema de toma de datos capaz de almacenar datos ambientales con marca temporal y video, que además pueda ajustar parámetros dependiendo de variables externas.
3. Diseñar una armazón de bajo costo capaz de llegar a bajas profundidades, fomentando las bases para llegar a desarrollar una estructura capaz de operar a mayores profundidades.
4. Verificar el funcionamiento apropiado del prototipo combinando los diseños mecánicos y electrónicos.

1.5 Estructura de documento

Este documento se divide en siete capítulos. El primer capítulo consiste en el capítulo introductorio, que consiste en el contexto del proyecto y generalidades de este. El segundo capítulo corresponde al marco teórico, y cubre temas de información general relevante a la elaboración de este proyecto. El capítulo tres corresponde al desarrollo metodológico. En este se explica la metodología utilizada para desarrollar este proyecto y se complementa con los pasos iniciales tomados en el desarrollo de este proyecto. Estos consisten en la identificación de necesidades y la búsqueda de conceptos. El cuarto capítulo consiste en el diseño de la solución, contemplando tanto el diseño mecánico como el electrónico. Adicionalmente se diseñan pruebas de validación para este sistema. El análisis de estas pruebas se cubre en el capítulo cinco. En el sexto capítulo se presenta un resumen de costos del prototipo creado, y por último se presentan conclusiones y recomendaciones en el capítulo siete.

Capítulo 2: Marco Teórico

En esta sección se incluyen investigaciones pertinentes a las distintas partes del proyecto. Se abarcan los componentes necesarios para un sistema BRUVS y se explica su funcionamiento. Por último se explica la norma que se va a utilizar como validación para el prototipo realizado.

2.1 BRUVS

Los BRUVS son una parte elemental de las investigaciones que se llevan a cabo en el CIMAR. Con ellos se puede determinar de forma más efectiva la distribución espacial de especies en las zonas de muestreo. Adicionalmente, si se realizan muestreos repetidos en los mismos puntos pero en distintas épocas, se puede determinar la distribución temporal de las mismas [2].

Para funcionar de forma efectiva, es necesario que cada dispositivo BRUVS cuente con las siguientes partes:

- **Dispositivo de grabación:** Este es el sistema principal de muestreo. Los investigadores analizan los videos que se toman para determinar las cantidades y tipos de especies que se vieron en la zona. Se requiere un dispositivo capaz de grabar en alta resolución de forma confiable.
- **Sensores:** Suelen existir como fuentes de datos secundarios. Normalmente se incluye un sensor de temperatura solamente. Sin embargo, se puede expandir para tener una gran gama de sensores que revela más información que la brindada por la cámara.
- **Carnada:** Se tiene un sistema de carnada que consiste de un tubo PVC con orificios. Se coloca carnada para aumentar la posibilidad de atraer a depredadores, que suelen ser las especies de interés en las investigaciones. Es importante resaltar que la carnada no se libera para no afectar de manera significativa al entorno de investigación.
- **Estructura:** Esta es la estructura que sujeta la cámara, la carnada y los sensores a una cuerda para ser sumergida. La estructura se encarga de darle estabilidad al sistema, y está construida de materiales resistentes a la corrosión como aluminio o acero inoxidable.

En la figura 2.1 se puede observar un sistema BRUVS, listo para ser colocado en el punto de muestreo. Estos puntos pueden variar desde los 3.5 a los 32.5 metros de profundidad, con una profundidad promedio de aproximadamente 11 metros [3].



Figura 2.1 BRUVS listo para ser colocado en un punto de muestreo. Fuente: CIMAR UCR

2.2 Single Board Computer

Una placa computadora, o SBC (single board computer), es un tipo de computadora que funciona dentro de una única placa impresa. Normalmente no suelen tener la capacidad computacional de una computadora convencional, sino que su ventaja principal surge de su capacidad relativa en un pequeño tamaño. Estas SBCs incluyen todo lo necesario para funcionar, incluyendo un puerto de alimentación, conectores USB para la conexión de dispositivos periféricos y salidas para monitores. Algunas SBCs incluyen funcionalidades adicionales como conexiones inalámbricas de WiFi y Bluetooth, o conectores especializados para una variedad de expansiones [7]. Algunos de estos SBCs incluyen adicionalmente pines de propósito general, o GPIO. Estos pines se pueden controlar en software para interactuar con componentes de hardware, como botones, LEDs o incluso dispositivos más avanzados como sensores o actuadores. Un ejemplo de un SBC, el Raspberry Pi 3B+, se ilustra en la figura 2.2.



Figura 2.2 Raspberry Pi 3B+. Fuente: Raspberry Pi Foundation

Este SBC cuenta con conexiones adicionales a las mencionadas anteriormente, la de interés siendo el conector de Interfaz de Cámara Serial 2 (CSI-2). Este conector permite la adición de un módulo de cámara para grabar. Al ser una interfaz dedicada para la toma de imágenes, se han realizado varias optimizaciones que permite al módulo de cámara ser más sencillo sin perder resolución o calidad de grabación [8]. De esta forma se reduce el costo del módulo y se puede aprovechar los recursos computacionales del Raspberry Pi.

El control de este SBC se puede realizar de distintas formas. La forma más sencilla es a través de programas escritos en lenguajes de programación como Python o C. Estos programas se pueden ejecutar de forma que se obtiene el resultado deseado, combinando los sistemas periféricos, los pines de propósito general y funciones internas del SBC.

2.3 Sensores MEMS

Existe una gran variedad de sensores que permiten medir las variables en un ambiente subacuático. Estos se pueden categorizar como sensores químicos y mecánicos. Los sensores químicos tienen la ventaja de que pueden realizar mediciones de características más específicas, como oxígeno disuelto o salinidad. Sin embargo, estos suelen ser más costosos, y se desgastan con

el uso. Por contraste, los sensores mecánicos son menos costosos y tienen una vida útil mayor. Sin embargo, estos se limitan a medir variables físicas más generales, como temperatura o presión.

Dentro de los sensores mecánicos existen los sensores MEMS, o Sistemas Microelectromecánicos. Estos son componentes que tienen partes móviles microscópicas, que cambian su comportamiento dependiendo de sus variables físicas. Un sensor de presión por ejemplo, ilustrado en la figura 2.3, mide la capacitancia entre dos placas que varían su distancia dependiendo de la fuerza P que se aplique al diafragma [9]. Este cambio en capacitancia luego se puede medir y calcular una presión.

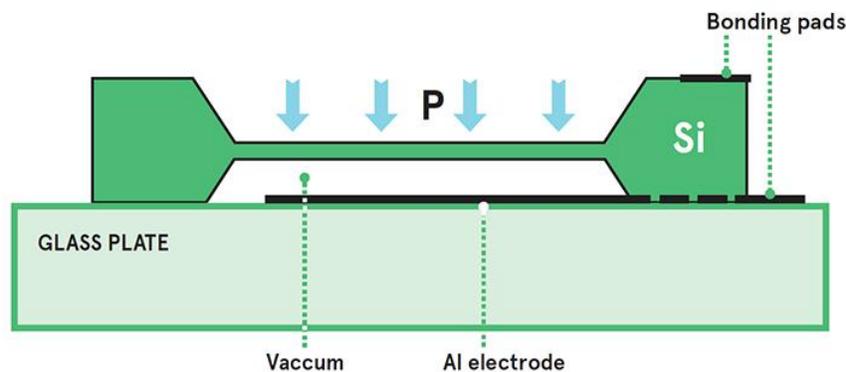


Figura 2.3 Diagrama de sensor de presión MEMS. [9]

Los sensores de temperatura MEMS funcionan de manera similar. Estos pueden consistir en un filamento que cambia su resistencia de manera no despreciable con cambios de temperatura. Otro método de medición consiste en medir la deformación de un filamento de material, similar al sensor capacitivo. Estos tipos de sensores se han miniaturizado y optimizado de tal forma que se pueden fabricar en masa, lo que reduce el costo significativamente.

2.4 Norma de validación

La norma IEC 60529, conocida también como la norma IP o *Ingress Protection*, se estableció para regular pruebas de resistencia al ingreso de agentes externos [10]. De esta forma, se tiene un método estandarizado de pruebas que además es fácil de interpretar. La norma indica dos tipos de pruebas, una para evaluar la resistencia al ingreso de partículas sólidas y otra para evaluar la resistencia a líquidos. Esto se representa en una clasificación IP, que consiste en dos

números de la forma IP(1)(2). El primer número evalúa la resistencia a partículas sólidas, y va en un rango de 0 - 6 dependiendo del tamaño de estas. Un valor de cero representa nada de protección y seis representa protección total, con los valores intermedio representando protección a distintos tamaños de partículas. El segundo valor representa la protección ante líquidos, y se utiliza un rango de 0 - 8 [11]. Se han establecido normas que aumentan el rango hasta 9, pero no son parte de la norma IEC 60529 y no se contemplan para el desarrollo de este proyecto. En este caso, un valor de cero representa ninguna protección, y un valor de 8 representa protección de ingreso a un metro de inmersión por al menos 30 minutos [12]. Los valores intermedios varían desde protección a goteo ocasional a inmersión parcial y total por distintas cantidades de tiempo. Es importante resaltar que para obtener un nivel de protección de 8 se puede tener mejores especificaciones, pero este es el mínimo establecido por la norma. Adicionalmente, se puede reemplazar alguno de estos números por una 'X' si no se realizan pruebas para determinar la resistencia en el dispositivo.

Esta norma es relevante al proyecto ya que se establecen pruebas que se pueden realizar para determinar la hermeticidad de un dispositivo a profundidades subacuáticas de un metro o más.

2.5 Relación Presión-Profundidad

Dado que en este documento se trata con datos de presión y profundidad subacuática, es necesario analizar la relación lineal que existe entre estas dos variables. Como se puede observar en la figura 2.4, el aumento en la presión es lineal con el aumento de la profundidad. En el caso del agua de mar, con una densidad de aproximadamente 1023.6 kg/m^3 , se tiene un aumento de aproximadamente 10.04 kPa por cada metro de profundidad que se incrementa.

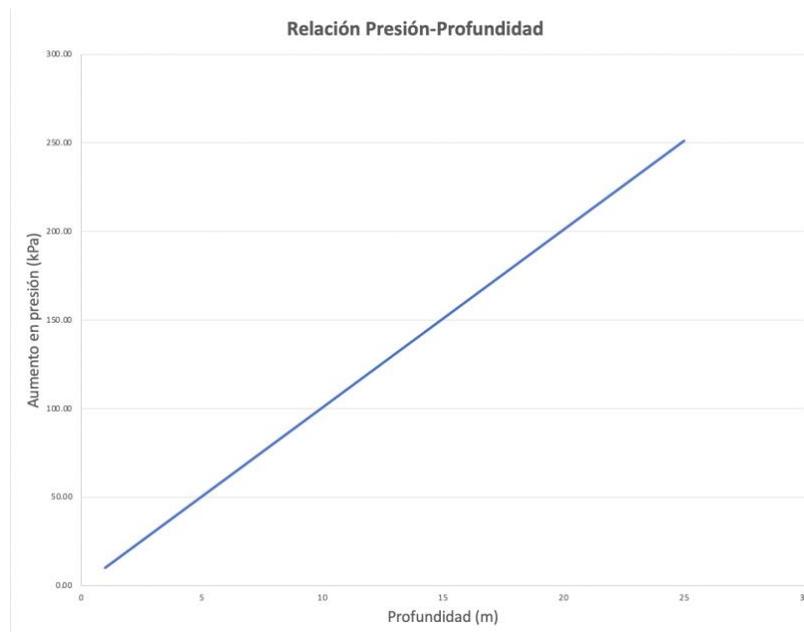


Figura 2.4 Relación Presión - Profundidad

Capítulo 3: Desarrollo metodológico

3.1 Metodología

Para solucionar este problema de ingeniería se acude a la metodología de diseño en ingeniería de Ulrich Eppinger, presentada en el libro Diseño y desarrollo de productos [5]. En este libro los autores delimitan un proceso para abordar sistemáticamente la detección de necesidades y generación de posibles soluciones. Dentro de este proceso se plantean distintas etapas que brindan una estructura para el desarrollo de un producto. Estas etapas se pueden observar en la figura 3.1.

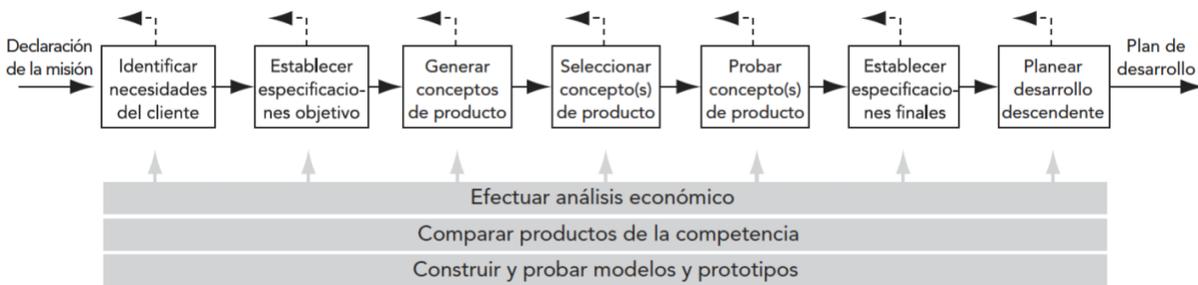


Figura 3.1 Etapas de proceso para el desarrollo de un producto. [5]

La metodología Ulrich Eppinger tiene un enfoque hacia la comercialización de productos. Para este proyecto, se ha limitado la duración de este proceso por lo que no se van a abarcar las etapas de planear el desarrollo descendente. Dentro de cada etapa se deben cumplir varios pasos, y adicionalmente se debe hacer una pequeña reflexión para verificar la validez de los resultados que se han obtenido

Iniciando por la etapa de identificación de necesidades del cliente, se debe realizar un estudio extenso para determinar las necesidades que este tiene. Para realizar esto, se pueden utilizar métodos de recolección de información como encuestas o entrevistas. Durante esta etapa es crucial detectar y evitar sesgos tanto del cliente como del desarrollador. Adicionalmente, es de suma importancia escuchar todo lo que el cliente tenga que decir, para obtener la mayor cantidad de información posible.

De esta identificación de necesidades se extraen las especificaciones objetivo que debe cumplir el producto. Estas deben ser una respuesta directa a las necesidades previamente expuestas por el cliente. Con especificaciones adecuadamente definidas se obtiene una buena guía para la investigación y el desarrollo, que pueden asegurar el cumplimiento satisfactorio del producto o prototipo. Para esto es necesario realizar una investigación que complemente la información brindada por el cliente, y así obtener métricas fundamentadas que sean alcanzables.

Luego continúa la etapa de generación de conceptos. En esta etapa se busca explorar todas las posibles soluciones que puedan responder a las necesidades del cliente. Para alcanzar esto es necesario realizar una combinación de búsquedas internas y externas. La búsqueda interna consiste en una reflexión del equipo o individuo, donde se busca utilizar conocimientos existentes aplicados de una forma creativa para brindar propuestas de posibles soluciones. Esto se complementa con la búsqueda externa, que consiste en investigaciones de temas de interés o de soluciones similares que han sido implementadas. Finalmente se realiza una exploración sistemática de distintas combinaciones de conceptos.

Después de haber explorado todas las soluciones posibles, inicia la delimitación y selección de conceptos. El propósito de esta etapa es seleccionar el concepto que mejor se adecúe a las necesidades del cliente y muestre mayor posibilidad de funcionar. Se utilizan matrices de selección que ayudan al proceso de delimitar. Adicionalmente, se pueden modificar los conceptos, combinando soluciones para dar una mejor solución.

Finalmente, se llega a la etapa de pruebas de concepto. En esta etapa se realizan pruebas para determinar el cumplimiento de las necesidades del cliente, y de la funcionalidad general del concepto. Esta etapa ayuda además a la evaluación de la viabilidad del prototipo para convertirse en un producto comercial. Dentro de esta etapa es necesario regresar a las etapas anteriores si el prototipo no funciona de la manera esperada. Además, se pueden plantear las especificaciones finales que se han determinado durante la ejecución de las pruebas.

3.2 Identificación de necesidades del cliente

La primera etapa de la metodología Ulrich Eppinger consiste en identificar las necesidades del cliente. Esto se realiza en cuatro pasos principales, adicionando una reflexión al final de estos. El primer paso consiste en la recopilación de información de parte del cliente. Este proceso se puede realizar de distintas maneras, pero en este caso se utilizó el recurso de las entrevistas. Se inició con varias reuniones con el coordinador del proyecto, el investigador Mario Espinoza. Tras determinar las principales necesidades y limitaciones de la elaboración del proyecto, se prosiguió a entrevistar a dos investigadores para determinar las verdaderas necesidades para el módulo de grabación en un BRUVS que se fuera a desarrollar. Las transcripciones de estas entrevistas se pueden encontrar en el Apéndice A.

Luego se procede a interpretar la información obtenida. Es de suma importancia no dictar el *cómo* del producto, sino el *qué*. Esta información se organiza de una forma jerárquica, para determinar la mejor forma de abordar la solución del problema, y donde se debe enfocar el desarrollo. A esto se le complementa con la importancia relativa que les da el cliente a las necesidades. Esto consiste en una escala del 1 al 5, con la escala que se presenta a continuación extraída de [5].

1. *La función es indeseable.*
2. *La función no es importante*
3. *Sería bueno tener esa función*
4. *La función es altamente deseable*
5. *La función es de importancia crítica*

Por último se reflexiona del proceso actual, con la intención de detectar algún sesgo o deficiencia en el proceso. Se agregan o modifican necesidades de ser necesario, y se completa el proceso. El resultado obtenido, de las necesidades en forma de enunciado con importancia relativa se presenta en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Enunciados de necesidades del cliente

Número	Necesidad	Importancia
1	El módulo de grabación tiene un diseño simple	5
2	El módulo de grabación es de bajo costo	5
3	El módulo de grabación puede operar a mayores profundidades	4
4	El módulo de grabación cuenta con iluminación auxiliar	3
5	El módulo de grabación cuenta con medición de profundidad	4
6	El módulo de grabación cuenta con medición de temperatura	4
7	El módulo de grabación tiene posibilidad de expansión de sensores y siste	5
8	El módulo de grabación es fácil de usar	5
9	El módulo de grabación tiene alta resolución de grabación	4
10	El módulo de grabación tiene una larga capacidad de grabación	5

3.3 Establecimiento de valores objetivo

Luego de haber delimitado las necesidades, es necesario establecer especificaciones que funcionen como guía para la elaboración del producto. Para esto, la metodología Ulrich Eppinger también delimita pasos a seguir. El primer paso, consiste en la elaboración de una lista de métricas. En esta, se deben responder a las necesidades del cliente de manera adecuada para asegurar un adecuado cumplimiento de las mismas. En la tabla 3.2 se observa la lista de métricas establecidas. Adicionalmente, en la tabla 3.3 se puede observar una matriz de correspondencia de necesidades y métricas. En esta se puede verificar que cada necesidad está resuelta por al menos una métrica, y adicionalmente que no se tengan métricas que no correspondan a ninguna necesidad.

Tabla 3.2 Lista de métricas

Número	Necesidad	Métrica	Importancia	Unidad
1	9	Resolución de grabación	4	p (pixeles)
2	10	Duración de grabación	5	h
3	10	Capacidad de batería	5	Wh
4	8	Facilidad de uso	5	subj
5	3	Profundidad de operación	4	m
6	5	Sensibilidad, profundidad	4	Pa
7	6	Sensibilidad, temperatura	4	°C
8	7	Posibilidad de expansión	5	subj
9	4	Iluminación	3	binario
10	2	Costo	5	\$
11	1	Simplicidad de diseño	5	subj

Tabla 3.3 Matriz de correspondencia de necesidades-métricas

	Resolución de grabación	Duración de grabación	Capacidad de batería	Facilidad de uso	Profundidad de operación	Sensibilidad, profundidad	Sensibilidad, temperatura	Posibilidad de expansión	Iluminación	Costo	Simplicidad de diseño
Tiene un diseño simple											X
Es de bajo costo										X	
Puede operar a mayores profundidades					X						
Cuenta con iluminación auxiliar								X			
Cuenta con medición de profundidad						X					
Cuenta con medición de temperatura							X				
Posibilidad de expansión de sensores y sistemas								X			
Es fácil de usar				X							
Tiene alta resolución de grabación	X										
Tiene una larga capacidad de grabación		X	X								

Para establecer una lista de valores objetivo es necesario realizar un estudio de productos similares ya disponibles en el mercado. De estos se extraen las especificaciones de interés. Dada la naturaleza única del proyecto, personalizado a las necesidades del CIMAR, estos valores se

utilizan mayormente como referencia. También fue necesario consultar con el supervisor e investigadores para determinar si estos valores son aceptables para el desarrollo del proyecto.

El resultado obtenido es una lista con la combinación ideal de distintos productos que se utilizan actualmente en el proceso de recolección de información con los BRUVS existentes. También se adicionan funcionalidades que se consideran una mejora a los productos actuales. Esta lista se puede observar en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Lista de especificaciones objetivo

Número	Necesidad	Métrica	Importancia	Unidad	Valor Marginal	Valor Ideal
1	9	Resolución de grabación	4	p (pixeles)	720	1080
2	10	Duración de grabación	5	h	1.5	2
3	10	Capacidad de batería	5	Wh	13.5	18
4	8	Facilidad de uso	5	subj	4	5
5	3	Profundidad de operación	4	m	10	50
6	5	Sensibilidad, profundidad	4	Pa	500	200
7	6	Sensibilidad, temperatura	4	°C	±1	±0.6
8	7	Posibilidad de expansión	5	subj	3	5
9	4	Iluminación	3	binario	No	Sí
10	2	Costo	5	\$	600	400
11	1	Simplicidad de diseño	5	subj	4	5

A pesar de que el proyecto busca diseñar un dispositivo con capacidad de funcionar a profundidades de más de 50 metros, para este primer prototipo se definió con el CIMAR una profundidad inicial de 10 metros. Esto se realiza para poder acelerar el proceso de desarrollo y lograr realizar el prototipo dentro del plazo del proyecto.

3.4 Generación de conceptos

Para continuar el proceso de diseño se deben generar conceptos de formas que se puedan abarcar los distintos problemas. Para esto, se realiza una descomposición funcional del problema. De esta forma se puede visualizar el funcionamiento de un prototipo. Una descomposición funcional se puede representar con un diagrama de entradas y salidas. En este, se definen las distintas entradas y salidas que va a tener el sistema y los módulos necesarios para su funcionamiento adecuado. Para el caso de este proyecto, se tienen varias entradas en forma de energía para alimentación, señales para control, y señales en forma de información del ambiente exterior. Un diagrama para la descomposición funcional de este sistema se puede observar en la figura 3.2.

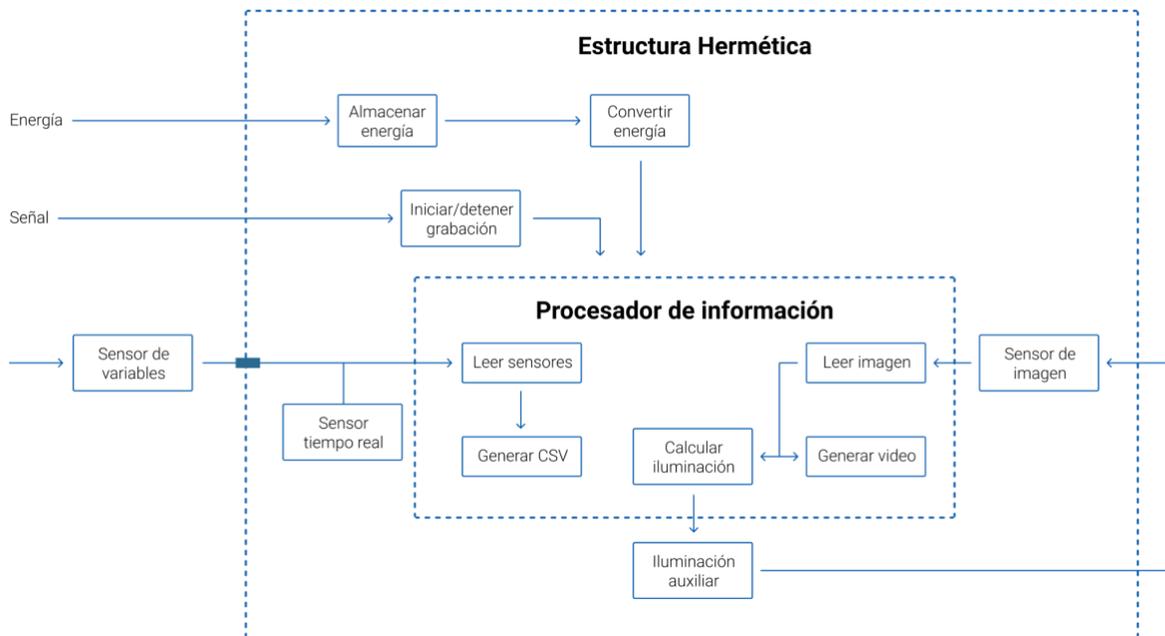


Figura 3.2 Descomposición funcional para un sistema BRUVS

De este diagrama es importante mencionar que existe un subsistema que lo envuelve todo, este siendo la estructura hermética. Adicionalmente se tiene un subsistema de procesador de información, pero este puede descomponerse en secciones más pequeñas. Adicionalmente se tiene un interfaz entre el exterior y el interior de la estructura hermética. Esta interfaz también es un concepto que se debe abordar como un concepto independiente.

Para plantear la resolución de este problema de la forma más efectiva, se va a dividir este en dos componentes principales. Estas son el sistema mecánico y el sistema electrónico. El sistema mecánico debe ser capaz de resistir las altas presiones subacuáticas y mantenerse hermético. Adicionalmente debe tener una ventana que permita el ingreso de luz para la cámara. También es necesario que el diseño permita ingresar al interior de la carcasa con facilidad. Para el diseño electrónico es necesario un sistema capaz de medir y almacenar variables de sensores. En este caso se determinó con el CIMAR que se iba a limitar las mediciones a temperatura y presión. Es necesario también tener un subsistema capaz de grabar videos y ajustar iluminación de ser necesario. Como requerimiento general, ambos sistemas deben ser de bajo costo y de fácil acceso en Costa Rica.

3.5 Búsqueda de conceptos

Para encontrar soluciones posibles a los subsistemas descritos anteriormente es necesario realizar una búsqueda de conceptos. Esto consiste en buscar soluciones posibles a los subsistemas definidos anteriormente en la figura 3.2. Para llevar esto a cabo, se divide el proceso de búsqueda en búsquedas internas y búsquedas externas.

El proceso de búsqueda interna consiste en utilizar los conocimientos existentes del individuo o equipo que realiza el proyecto. Se considera que la forma más efectiva de realizar esta búsqueda es utilizando la herramienta de lluvia de ideas. Para este proceso, es necesario seguir cuatro pasos [5]:

1. **Suspender el juicio:** Al suspender el juicio durante la duración de la actividad, se puede generar una mayor cantidad de ideas. Independientemente de si estas ideas se consideran buenas o no, tener un conjunto grande de ideas es beneficioso para considerar todas las alternativas posibles.
2. **Generar muchas ideas:** Cuando se genera la mayor cantidad de ideas posible, la probabilidad de cubrir todo el espacio de soluciones aumenta. De esta forma, se puede maximizar la variedad de soluciones explorada.

3. **Aceptar ideas que puedan parecer no factibles:** A pesar de que una idea parezca no ser práctica, esta podría ser mejorada o modificada para ser una mejor solución de lo que se creyó originalmente. También es posible que esa idea sirva de inspiración para otros conceptos.
4. **Usar medios gráficos y físicos:** Acudir a bocetos o modelos físicos puede ser beneficioso para la explicación de un concepto. Modelar o bosquejar una idea puede ayudar a refinarla o transmitirla.

Para la búsqueda externa, es necesario consultar fuentes ajenas al equipo o individuo. La más efectiva es la búsqueda en línea, ya que se tiene acceso a una gran cantidad de información. Se recomienda utilizar un proceso de expandir y enfocar [5]. Esta estrategia consiste en expandir el área de búsqueda momentáneamente, y luego enfocarse en los resultados que muestren más promesa. Esto se puede realizar para el proyecto en general o para cada subsistema, y de esta forma delimitar el área de búsqueda de forma efectiva y eficiente.

Tras realizar este proceso de búsqueda para los subsistemas descritos anteriormente, se tabularon los resultados y se presentan en la tabla 3.5. Estos conceptos se proceden a analizar a mayor profundidad en el capítulo 4.

Tabla 3.5 Resultados de búsqueda de conceptos

Diseño mecánico			Diseño electrónico			
Forma de carcasa	Material de carcasa	Ventana	Procesador	Cámara	Sensores	Iluminación
Esfera	PVC	Acrílico	SBC	Modulo camara	Sensor temperatura + sensor presión	LEDs 5mm
Prisma	Aluminio	Polycarbonato	Microcontrolador Atmega	Cámara independiente	Sensores unificados	Leds SMD + mosfet
Cilindro	Acrílico	Vidrio	Microcontrolador STM32			Leds driver integrado
Moldeado	Plástico					

3.6 Evaluación de conceptos

La metodología Ulrich Eppinger estipula que el siguiente paso, una vez obtenida la lista de conceptos, es realizar una exploración sistemática de las combinaciones de conceptos. Normalmente se favorecen las combinaciones que más tengan sentido y muestren potencial de ser una solución viable. Sin embargo, en el ámbito de este proyecto se considera que una exploración sistemática no es beneficiosa para el proyecto, ya que en general no se tiene una dependencia entre subsistemas. Por ejemplo, la elección del procesador no afecta el tipo de sensor que se vaya a utilizar, ya que todos los procesadores tienen las mismas características respecto a protocolos de comunicación. Las decisiones tomadas y sus respectivas justificaciones se presentan en el capítulo siguiente, que trata del diseño de la solución.

Para evaluar los conceptos se utiliza una matriz de evaluación de conceptos. En esta, se utilizan distintos criterios de selección para asignar valores a cada concepto. Estos criterios se basan en las necesidades previamente extraídas de las entrevistas de los investigadores. Dado que el CIMAR no tiene un departamento de ingeniería, fue necesario acudir al criterio experto para determinar criterios adicionales que no fueran contemplados por las necesidades expuestas. Luego se procede, mediante una suma ponderada, a calcular la puntuación de cada concepto de la tabla basándose en las características del mismo. De esta forma, se puede determinar más fácilmente cuál concepto presenta las mayores ventajas para la aplicación. Estas tablas son el principal método utilizado para la evaluación y selección de conceptos en el capítulo 4.

Capítulo 4: Diseño de Solución

Para este capítulo se divide el proceso de diseño en tres subsecciones. La primera consiste en el diseño del sistema electrónico. La segunda se compone del proceso de diseño para el sistema mecánico, o la carcasa. Por último, se tiene la sección de diseño de pruebas para la validación del dispositivo.

4.1 Diseño mecánico

En esta sección se presenta todo lo pertinente al diseño de la carcasa hermética. Se discute la selección de materiales, y los pasos tomados para el diseño de las partes personalizadas. También se justifican las decisiones tomadas en el proceso de diseño mecánico.

4.1.1 Carcasa

Partiendo de los conceptos delimitados anteriormente en la sección 3.5, se procede a seleccionar la forma de la carcasa y su material. Se inicia definiendo la forma de esta. Una matriz de evaluación para este criterio se presenta en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Matriz de evaluación para la forma de la carcasa

		Forma de carcasa							
		Esfera		Prisma rectangular		Cilindro		Moldeado	
Criterio de selección	Peso (%)	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Resistencia a presión	40	5	2	2	0.8	4	1.6	3	1.2
Simplicidad de diseño	30	3	0.9	4	1.2	4	1.2	4	1.2
Costo estimado	30	2	0.6	5	1.5	4	1.2	1	0.3
Total puntos			3.5		3.5		4		2.7
Lugar			2		2		1		4
Desarrollar			No		No		Si		No

De esta matriz de evaluación se puede extraer que la mejor opción para la forma de una carcasa es una forma cilíndrica. A pesar de ser una estructura con menos tolerancia a presión que la esfera, es una forma estándar que permite reducir el costo de desarrollo. Una carcasa en forma de prisma rectangular podría ser más sencillo de manufacturar, pero presenta una fuerte desventaja en la resistencia a presión. Adicionalmente, los cálculos para determinar su presión máxima se pueden tornar más complejos, dejando más espacio para errores. Por último, se tiene una carcasa moldeada. Esta tiene la mayor eficiencia de espacio, ya que se podría diseñar a la forma que se requiera para todos los componentes internos. Sin embargo, este es un proceso complejo y costoso a la hora de manufacturar, por lo que no cumple con el requisito de bajo costo y no se puede perseguir.

Habiendo elegido la forma de la carcasa, se procede a elegir el material de esta. Nuevamente se basa en los resultados obtenidos en la sección 3.5. Primero se realiza una búsqueda de características, la cual se presenta en la tabla 4.2. El análisis de estas opciones se observa en la matriz de evaluación en la tabla 4.3.

Tabla 4.2 Tabla de comparación para distintos materiales

Característica	Tabla de comparación			
	PVC	Acrílico	Aluminio	Plástico
Resiste corrosión	Sí	Sí	Genera óxido en capa exterior	Sí
Presión máxima	2.55 Mpa	5.2 Mpa	8.9 MPa	--
Suplidor	Ferreterías	Distribuidor especializado	Extranjero	Distribuidor especializado
Operaciones para trabajar	Corte con segueta, pegamento PVC	Corte con segueta, solución de cloroformo	Corte con segueta, soldadura	Corte con segueta, pegamento

Tabla 4.3 Matriz de evaluación para material de carcasa

		Material de carcasa							
		PVC		Acrílico		Aluminio		Plástico	
Criterio de selección	Peso (%)	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Resistencia a corrosión	20	5	1	5	1	3	0.6	5	1
Resistencia a presión	20	5	1	5	1	5	1	4	0.8
Disponibilidad	25	5	1.25	3	0.75	2	0.5	4	1
Facilidad de trabajar	20	4	0.8	3	0.6	2	0.4	3	0.6
Costo	15	4	0.6	3	0.45	2	0.3	3	0.45
Total puntos		4.65		3.8		2.8		3.85	
Lugar		1		3		4		2	
Desarrollar		Sí		No		No		No	

Del resultado de esta tabla es evidente que la opción más viable para material es el PVC. Este material es el más ampliamente disponible, es fácil de manipular y posee un costo accesible. Las capacidades del PVC se discuten a mayor profundidad en secciones posteriores, principalmente en la 4.1.2 y 4.1.6.

Por último, se debe elegir el material para la ventana de la carcasa. Este elemento es de suma importancia ya que permite el intercambio de luz entre el exterior y el interior. Este intercambio sucede tanto de afuera hacia adentro, para que el sensor de imagen pueda grabar, como de adentro hacia afuera, en forma de la iluminación auxiliar. La matriz de evaluación para la ventana se presenta en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Matriz de evaluación para material de ventana

		Materiales de ventana					
		Vidrio		Acrílico		Policarbonato	
Criterio de selección	Peso (%)	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Costo	30	1	0.3	5	1.5	4	1.2
Seguridad	20	1	0.2	4	0.8	4	0.8
Transmitancia	25	5	1.25	5	1.25	4	1
Tensión de rotura	25	2	0.5	4	1	4	1
Total puntos		2.25		4.55		4	
Lugar		3		1		2	
Desarrollar		No		Si		No	

De esta tabla se puede concluir que la opción más viable es la del acrílico. Este material presenta un bajo costo, lo cual permite el cumplimiento de las necesidades del proyecto. También tiene una alta seguridad, en el sentido de que si se rompe no llega a ser peligroso a los usuarios a diferencia del vidrio. Este material también tiene una alta transmitancia, comparable a la del vidrio, lo que significa que la cantidad de luz que refracta es menor a la del policarbonato [13]. Por último, posee una alta tensión de rotura [14]. Esto es beneficioso para esta aplicación ya que se va a operar en un entorno de alta presión.

4.1.2 Selección de partes

Para responder a las necesidades estipuladas anteriormente respecto al costo y la simplicidad del diseño, se busca reducir la cantidad de partes no estándar que se utilizan. De esta forma, buscar repuestos es más sencillo. Se puede reducir el costo al implementar partes que se producen en masa, y son más fáciles de conseguir en el mercado costarricense. Las piezas no estándar que se tengan que fabricar agregan costo y complejidad al prototipo.

Por esta razón, se utilizan accesorios de PVC disponibles en virtualmente todas las ferreterías. El tipo de PVC que se elige es el de grado SCH 80, conocido coloquialmente como PVC de pared gruesa. Los accesorios de PVC SCH 80 tienen una clasificación más alta de tolerancia de presión, lo cual lo hace un candidato ideal para esta aplicación [15]. Para el desarrollo de esta carcasa, se eligieron accesorios de PVC de diámetro interno de 3", o aproximadamente 75mm. Este tamaño es el más pequeño que se puede utilizar que permite suficiente espacio para los componentes electrónicos elegidos. De esta forma, se minimiza el tamaño de la carcasa sin causar interferencias con el diseño electrónico.

La carcasa debe proveer un espacio hermético para el dispositivo electrónico, una ventana que permita a la cámara ver hacia afuera, y un acceso para poder ingresar y extraer el dispositivo electrónico. Para buscar accesorios de PVC que cumplieran estas funciones, se analizaron varios catálogos en línea de ferreterías. Tras generar una lista preliminar de partes, se visitó dos ferreterías

para buscar estas partes y verificar que fueran accesibles. La lista de accesorios y su función se presentan en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Lista de accesorios PVC SCH 80 utilizados en el diseño de la carcasa

Accesorio PVC SCH 80	Función	Imagen
Unión de 3"	Cuerpo de la carcasa	
Reducción 3 x 2"	Tapa frontal que permite la sujeción de una ventana	
Adaptador de limpieza 3"	Base donde se puede enroscar una tapa que permite acceso al interior de la carcasa	
Tapón para adaptador de limpieza 3"	Tapón que se coloca en la base que se puede remover para acceder al interior de la carcasa	

Habiendo seleccionado los componentes principales que van a formar la carcasa, se debe resolver el problema de la ventana de acrílico. Esta ventana se diseña para ser juntada con adhesivo a la reducción de 3 x 2". El diseño se realiza para ser cortado en láser de una lámina de acrílico transparente de 6mm de grosor. Un boceto de esta pieza se presenta en la figura 4.1.



Figura 4.1 Boceto para pieza de ventana de acrílico

En esta pieza se observan dos círculos concéntricos, del diámetro aproximado de las circunferencias presentes en la pieza de reducción de 3 x 2". El propósito de estos círculos es ser grabados con el láser. Esto aumenta la rugosidad de la pieza en estas secciones, lo que aumenta el área superficial donde se puede adherir el pegamento utilizado. Adicionalmente, se realizan 12 orificios para sujetar la ventana a la reducción de PVC mientras se cura el pegamento. Estos orificios se diseñan para aceptar tornillos #6 x 1/2" de acero inoxidable. A pesar de no ser métricos, estos tornillos son fáciles de conseguir y de muy bajo costo.

Para ensamblar los accesorios de PVC con la ventana de acrílico, se sigue la secuencia presentada en la figura 4.2. Es necesario tomar en cuenta la sección 4.1.3 referente al pegamento de estas piezas para tener un ensamblaje exitoso, y la sección 4.1.5 para la modificación de las partes estándar.

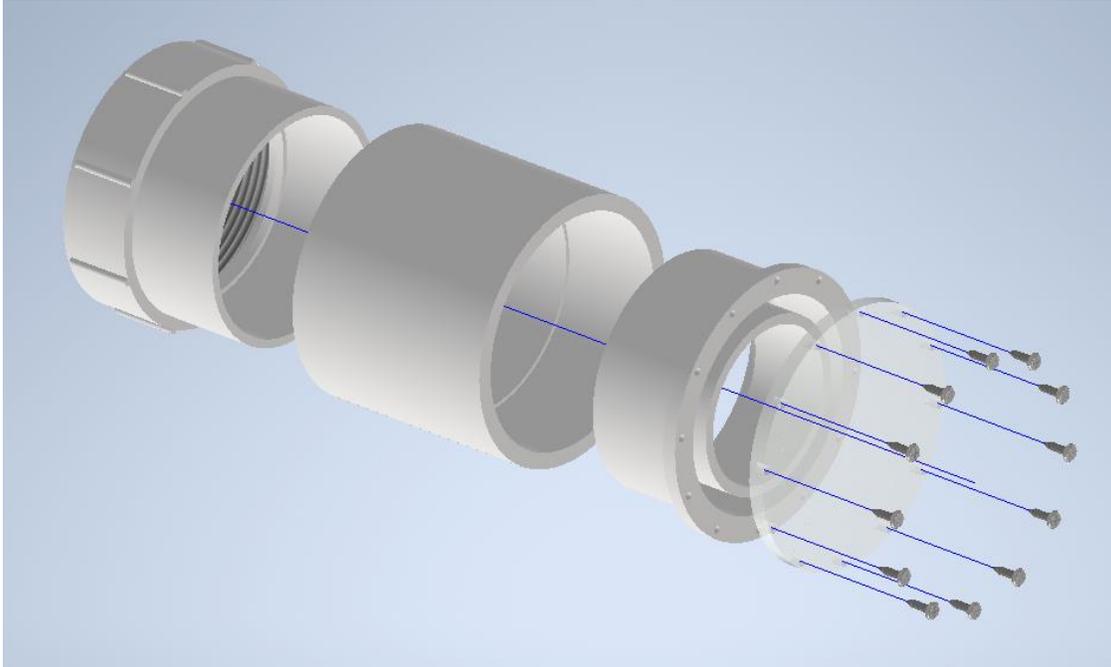


Figura 4.2 Vista en explosionado del ensamble de la carcasa

4.1.3 Pegamento

Todas las juntas que no sean removibles se van a realizar con pegamento. Al ser una unión permanente, se tiene mayor resistencia y un sello más seguro contra el ingreso del agua. Aunque esto no se considera en los cálculos, unir dos piezas con pegamento puede reforzar estas para tener una pieza final con mayor resistencia a la presión. En el desarrollo de este proyecto se utilizan principalmente dos pegamentos para la función de hermeticidad y soporte estructural.

El primer pegamento es el Wet-Dry PVC Cement SM-248 de Lanco. Se utiliza para adherir todos los accesorios de PVC entre ellos. Este pegamento fue diseñado específicamente para accesorios de PVC de clase SCH 40 y SCH 80, hasta un máximo de 8 pulgadas de diámetro. Tiene un tiempo de curación de aproximadamente 24 horas, y puede resistir presiones de hasta 370 psi [16]. La metodología de aplicación de este pegamento se especifica en su ficha técnica. Antes de colocar el pegamento se debe limpiar las superficies para remover cualquier tipo de suciedad o grasa que pudo haberse depositado durante el manejo de los accesorios de PVC. Tras aplicar el pegamento, se recomienda girar ambas piezas por al menos $\frac{1}{4}$ de giro para asegurar adhesión

uniforme en la unión. Se deben dejar las piezas al menos 15 minutos antes de manipulación para no desprender la unión realizada.

Una ventaja importante de este pegamento es que está aprobado para tuberías de agua potable. Esto se debe a que no libera toxinas o químicos peligrosos una vez se haya curado. Gracias a esta característica se considera seguro para ser utilizado en ámbitos marítimos donde hay especies sensibles a químicos ajenos a su ecosistema.

El segundo pegamento consiste en un epoxi de grado marítimo, el Epoxy Marine 1919324 de Loctite. Este es un pegamento tipo epoxi de dos partes, que se deben mezclar a partes iguales para endurecer la sustancia. Tiene un tiempo de endurecimiento de 2 horas, con una curación total luego de 24 horas. La ventaja principal de este pegamento es su capacidad de adherirse a superficies como el PVC y el acrílico. Esto lo hace ideal para la unión entre la reducción de PVC de 3 x 2" y la ventana de acrílico. De esta forma, se realiza un sello hermético entre las dos piezas. Una vez curado completamente, se tiene una resistencia a la tracción de 3000 psi [17].

Este pegamento tiene alta resistencia a ambientes corrosivos como el agua marina. Puede incluso curarse bajo agua, lo que evidencia una alta resistencia a esta. Por estas características se considera este pegamento una opción ideal para la adhesión de la ventana de acrílico a la carcasa. También se puede utilizar en aplicaciones de encapsulamiento de electrónica, por lo que se puede utilizar para encapsular los sensores necesarios.

4.1.4 Sello de rosca

Debido a las tolerancias de manufactura para el acople de limpieza y su respectiva tapa, no se considera que existe un sello completamente hermético entre estas dos partes. Por ende, es necesario implementar un sello para solucionar esta imperfección en tolerancias.

La solución que se implementa es la inclusión de una junta tórica, también conocida como un o-ring. Este tipo de juntas se utiliza en aplicaciones para sellar o aislar dos zonas distintas, usualmente cuando se trata de un ambiente con distintas presiones. Estos pueden incluir cilindros

hidráulicos o cilindros neumáticos. Dado que estas juntas tóricas se utilizan en aplicaciones similares, se elige este método para sellar la rosca y evitar que ingrese el agua a la carcasa.

Para el proceso de búsqueda se utilizó el catálogo de productos de la distribuidora de sellos SuperEmpaques Costa Rica. Dentro de este catálogo se encontró un tipo de junta conocida como anillo Quad, o Quad-seal en inglés. Este es un tipo de perfil de juntas tóricas que consiste en cuatro lóbulos. Se puede apreciar este tipo de perfil en la figura 4.3.



Figura 4.3 Perfil de anillo Quad [18]

El anillo Quad tiene varias ventajas ante los perfiles circulares convencionales. La primera es que este tipo de perfil provee dos sellos en vez de uno, ya que entra en contacto con las superficies que toca en dos puntos. Adicionalmente, este diseño está optimizado para mantener su forma en aplicaciones industriales donde hay movimientos rotatorios [19]. Es claro que en esta aplicación no hay movimientos rotatorios de alta velocidad o frecuencia, pero esta característica del anillo Quad permite mayor capacidad de retener su forma cuando se cierra el acople de limpieza, ya que este consiste en una rosca.

La propuesta para colocar esta junta tórica es donde el tapón de limpieza se junta con el acople de limpieza. Un boceto ilustrativo se presenta en la figura 4.4. Es importante tomar en cuenta que este boceto no está a escala, y se referencia solamente como apoyo visual. Aquí se aprovecha las características de los accesorios de PVC, ya que existe un espacio entre el tapón de limpieza y la base del acople. Para no tener que modificar estas piezas, se utiliza este espacio para colocar la junta. Estos puntos se indican con los círculos azules.

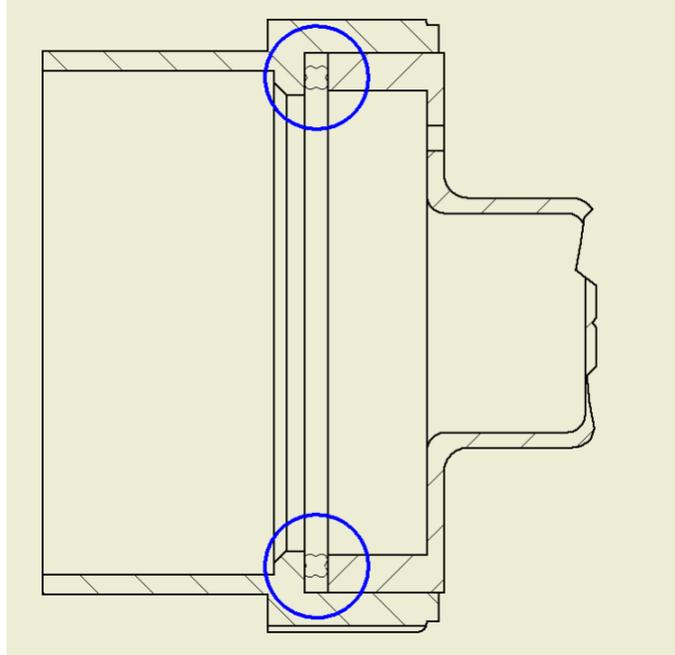


Figura 4.4 Propuesta de instalación para anillo Quad

Tomando nuevamente como referencia el catálogo de SuperEmpaques, se selecciona el anillo Quad con número de parte QR-4338. Este posee un radio ligeramente mayor al radio interno del acople de limpieza, lo que permite una ligera compresión del anillo Quad. Se recomienda una compresión máxima del 40% para sellos de tipo estático [20]. Se procede a calcular:

$$C = 1 - \frac{0.5(B_d - G_d)}{CS} \quad (4.1)$$

Donde C es la compresión, B_d es el diámetro interno del orificio, G_d es el diámetro externo de la base, y CS es la sección transversal de la junta tórica. Se tiene que:

- $B_d = 83\text{mm}$
- $G_d = 76.5\text{mm}$
- $CS = 5.33\text{mm}$

Por ende, se calcula:

$$C = 1 - 0.5(83 - 76.5)/5.33$$

$$C = 0.39$$

Con una compresión de 0.39 o 39%, se determina que el anillo Quad QR-4338 es el tamaño ideal para las dimensiones de esta aplicación.

4.1.5 Modificación de partes

Para la exitosa construcción del prototipo es necesario realizar modificaciones a algunas de las partes estándar seleccionadas anteriormente. Estas partes son la reducción de 3" a 2", y el tapón del acople de limpieza. Los planos de las modificaciones de estas piezas se encuentran en el apéndice C, al igual que los planos para las otras piezas.

En la figura 4.5 se presenta un boceto de la modificación necesaria para la reducción de 3". Esta modificación consiste en realizar doce orificios de un diámetro de 3mm, equitativamente distribuidos en una circunferencia de 95mm de diámetro. Esto se realiza para que esta pieza se pueda alinear con la ventana de acrílico diseñada. Los orificios de 3mm corresponden al agujero piloto requerido los tornillos #6 seleccionados.

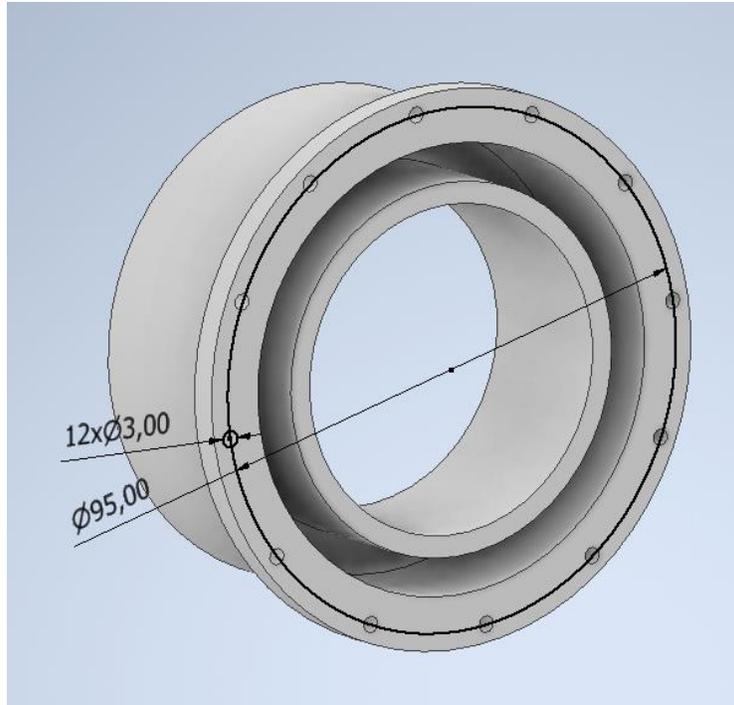


Figura 4.5 Modificaciones necesarias a la reducción

En la figura 4.6 se puede observar la modificación necesaria al tapón de acople de limpieza. Esta modificación consiste solamente en un orificio de 4mm de diámetro aproximadamente a 14mm del borde de la pieza. Este orificio permite que los cables necesarios para el sensor de profundidad puedan pasar, y ser encapsulado. Este proceso se discute a mayor profundidad en la sección 4.1.7.

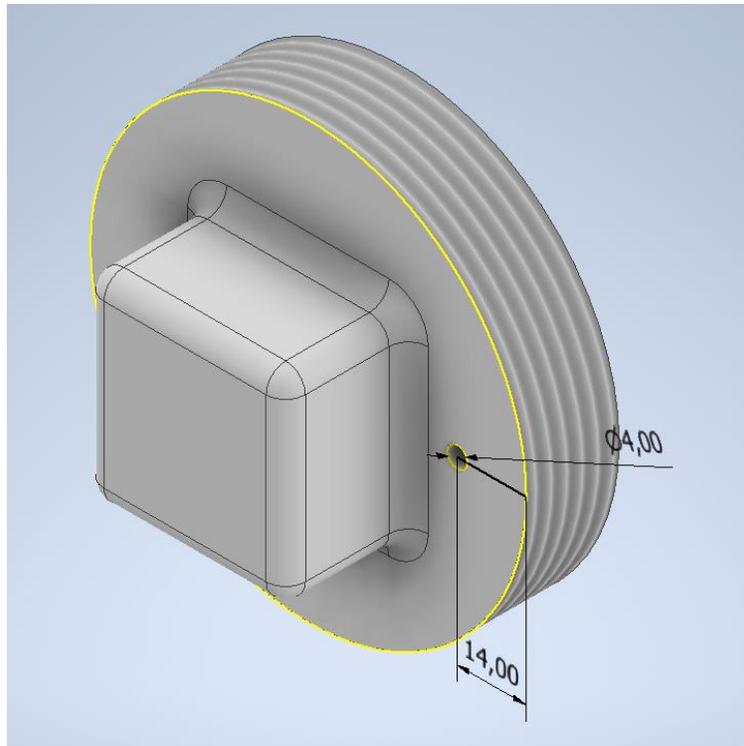


Figura 4.6 Modificaciones necesarias al tapón de acople de limpieza

4.1.6 Cálculos de profundidad

Los cálculos de profundidad se realizan para estimar la profundidad máxima teórica a la que este diseño podría resistir. Para esto, se utilizan los datos disponibles en fichas técnicas de accesorios PVC, información de acrílico y los adhesivos utilizados.

Para realizar los cálculos de profundidad se utiliza la ecuación de presión en una columna uniforme de una sustancia, presentada en la ecuación 4.2:

$$P = \rho gh \quad (4.2)$$

Donde:

P: Presión en Pascales

ρ : densidad del agua, tomada como 1023.6 kg/m³ para agua de mar

g: aceleración de gravedad, tomada como 9,81 m/s²

h: la profundidad en metros

Adicionalmente, dado que toda la información se encuentra en PSI, es necesario convertir a kPa utilizando la relación:

$$1 \text{ psi} \times 6895 \approx 1 \text{ kPa} \quad (4.3)$$

En la tabla 4.6 se tienen los valores de presión máxima permisible para los distintos componentes utilizados en este ensamble.

Tabla 4.6 Presión máxima permisible para distintos componentes

Componente	Presión (psi)	Presión (kPa)
Accesorios PVC SCH80	370 [15]	2550
Pegamento PVC	370 [16]	2550
Epoxi	3000 [17]	20 680
Acrílico 6mm	1500 [14]	10 340

Es necesario mencionar que el acrílico tiene un esfuerzo máximo permisible de 10000 psi, pero se recomienda no superar un valor de 1500 para maximizar su vida útil. Utilizando la ecuación 4.1, se procede a calcular la presión teórica máxima para los componentes de la carcasa. En todos los cálculos se asume una carcasa completamente hermética con una presión interna igual a la presión atmosférica en el nivel del mar.

$$\frac{P}{\rho g} = h \quad (4.4)$$

$$\frac{2\ 550\ 000}{10\ 041.5} = h$$

$$253.9m = h$$

Se procede a realizar los mismos cálculos para todos los componentes en la lista, y sus resultados se presentan en la tabla 4.7.

Tabla 4.7 Profundidad máxima teórica para distintos componentes

Componente	Profundidad (m)
Accesorios PVC SCH80	253.9
Pegamento PVC	253.9
Epoxi grado marino	2 059.4
Acrílico 6mm	1 029.7

De esta tabla se puede observar que la limitante consiste en los accesorios de PVC y el pegamento de este, ya que toleran un máximo de aproximadamente 253.9 metros de profundidad. Los valores de profundidad para el epoxi grado marino y el acrílico dan valores a mucha mayor profundidad. Se debe aclarar que estos cálculos deben utilizarse como una referencia y no representan profundidades máximas. Esto se debe a que no se contemplan las interacciones entre componentes, como el acrílico y el PVC. Cuando se someta esta carcasa a presión el acrílico y el PVC se van a deformar a distintas tasas, lo que va a generar un mayor esfuerzo en el epoxi.

4.1.7 Encapsulamiento del sensor

El encapsulamiento del sensor es un proceso crucial para asegurar la hermeticidad de la carcasa, al igual que permitir la comunicación del sensor en el exterior con el procesador en el interior. Comúnmente los sensores se encapsulan en una pieza que se denomina un penetrador. Este componente se asemeja a un tornillo con un orificio a través de su longitud. De un extremo de este orificio se encapsula el sensor, y los cables se colocan a través de este. Luego, se realiza un orificio en la carcasa a utilizar y se coloca el penetrador con el sensor a través de este. Un boceto de este sistema se presenta en la figura 4.7.

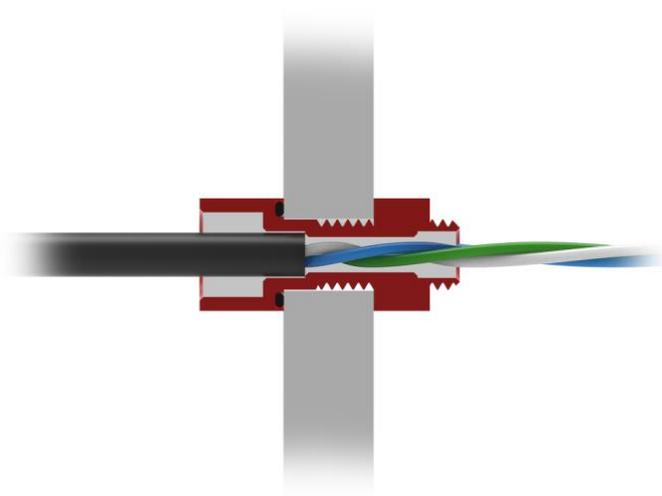


Figura 4.7 Corte transversal de un sistema penetrador [21]

La ventaja de este sistema es que los sensores que se coloquen se pueden remover al aflojar el penetrador. Sin embargo, una debilidad que tiene este sistema es que genera dos puntos de falla en la carcasa. El primer punto de falla es en el interior del penetrador, donde puede fallar si el sensor no se encapsula apropiadamente. El segundo punto consiste en la interfaz entre el penetrador y la carcasa. Dado que estos consisten en dos tipos de métodos distintos de sellar, agrega complejidad y costo al diseño de la carcasa.

Para compensar por esta desventaja, se encapsula el sensor directamente en el tapón de PVC. Esto no es ideal ya que, si se deseara, el sensor no se podría reemplazar. Sin embargo, el

tapón es de bajo costo, por lo que podría ser reemplazado con el sensor de ser necesario. Además, en caso de querer agregar distintos sensores al sistema se pueden encapsular en distintos tapones, y así poder elegir los sensores que se desean utilizar sin necesidad de remover y ajustar un penetrador. Un boceto del diseño propuesto se presenta en la figura 4.8.

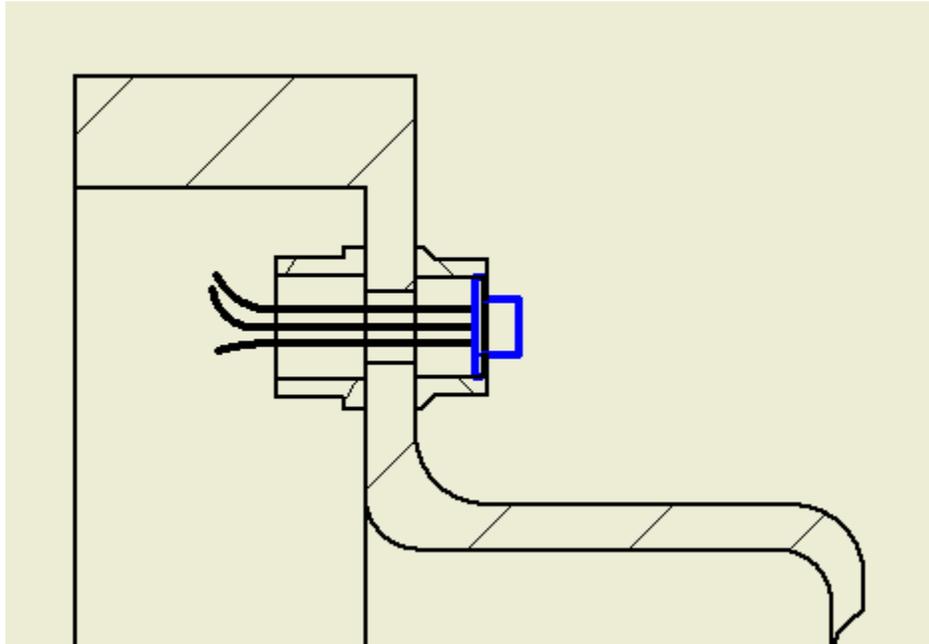


Figura 4.8 Corte transversal del sistema de encapsulamiento directo de sensores

En este boceto, se puede observar como solamente hay un punto de fallo en este método de penetración. Este es el punto donde atraviesan la carcasa los cables del sensor. Se observan también dos piezas, diseñadas para sujetar el sensor y limitar el esparcimiento del material de encapsulamiento que se va a utilizar. Estas piezas no llevan ninguna fuerza significativa por lo que se pueden obviar en los cálculos. En este caso, se va a implementar el epoxy descrito anteriormente en la sección 4.1.3. El Epoxy Marine 1919324 se utiliza para el encapsulamiento por las características descritas anteriormente. Su uso en este caso además evita incluir otro tipo de pegamento a la lista de materiales necesarios para la construcción de un prototipo. El resultado del proceso de encapsulamiento se ilustra en la figura 4.9.



Figura 4.9 Encapsulamiento del sensor

En esta figura se puede observar el encapsulamiento del sensor. Se conectan cuatro cables a este antes de realizar el encapsulamiento, ya que al encapsular el sensor no se puede acceder a sus contactos. Al extremo de estos cables se coloca un conector de 4 pines, que se utiliza para la conexión al sistema electrónico discutido en la sección 4.2.

4.2 Diseño electrónico

Para el diseño electrónico se contemplan todos los subsistemas definidos previamente en la sección 3.4 que correspondan a los sistemas que no forman parte del sistema mecánico. Estos consisten en los siguientes:

- Procesador de información
- Sensor de imagen
- Iluminación auxiliar
- Sensores de variables
- Alimentación del dispositivo

La selección final de estos componentes y su justificación correspondiente se describe en las siguientes secciones.

4.2.1 Selección del procesador de información

El procesador de información es el componente de mayor importancia en el sistema electrónico ya que es el encargado de coordinar la toma de datos de los sensores, ajustar la iluminación y controlar la captura de video. Todo esto se puede realizar de dos formas. Utilizando un único controlador integrado, que sea capaz de leer los sensores y capturar imagen, o implementando dos sistemas separados. Como se observa en la descomposición funcional de la figura 3.2, el procesador se puede dividir en dos secciones ya que no se requiere interacción entre el proceso de leer sensores y leer imagen.

Se eligieron varios dispositivos controladores para efectuar el análisis. La ventaja de estos es su familiaridad y disponibilidad amplia en el mercado, tanto internacional como costarricense. El análisis llevado a cabo evaluando la capacidad de cada dispositivo se puede observar en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Características de varios controladores candidatos

Característica	Controladores			
	Raspberry Pi 4B	STM32F103	ATMega328	BeagleBone Black
Memoria	Depende de tarjeta SD	32kB	128kB	4GB
RAM	1GB	2kB	20kB	512MB
GPIOs	26	37	14	65
ADCs	0	10	6	7
Protocolos de comunicación	Serial, I2C, SPI, OneWire, USB, CSI-2	Serial, I2C, SPI, OneWire, USB	Serial, I2C, SPI, OneWire	Serial, I2C, SPI, OneWire, USB
Adicionales	CSI-2	RTC, CAN	--	Ethernet
Costo	\$58.95	\$4.95	\$7.95	\$59.95

Como se puede observar en esta tabla, hay una disparidad entre los microcontroladores y los SBCs Raspberry Pi y BeagleBone Black. Naturalmente se podría tender a elegir el ATMega328 o el STM32F103, ya que presentan un bajo costo y una capacidad similar de controlar y leer los sensores con su amplia variedad de protocolos de comunicación. Incluso estos incluyen convertidores de señales analógicas a digitales (ADCs) que permiten monitorear el nivel de la batería. Sin embargo, la verdadera ventaja del Raspberry Pi recae en su puerto de expansión CSI-2. Si se combina con un módulo de cámara, se puede llegar a tener un nivel de integración mayor. El BeagleBone Black si incluye ADCs, pero carece de puertos adicionales de expansión para la cámara. La matriz de evaluación se presenta en la tabla 4.9.

Tabla 4.9 Matriz de evaluación para los controladores seleccionados

		Controlador							
		SBC Raspberry Pi 4B		STM32F103		ATMega328		SBC BeagleBone Black	
Criterio de selección	Peso (%)	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Protocolos de comunicación	30	5	1.5	5	1.5	4	1.2	5	1.5
Capacidad de procesamiento	30	5	1.5	3	0.9	3	0.9	5	1.5
Capacidad de integración	25	5	1.25	2	0.5	2	0.5	4	1
Costo	15	2	0.3	5	0.75	4	0.6	1	0.15
Total puntos		4.55		3.65		3.2		4.15	
Lugar		1		3		4		2	
Desarrollar		Si		No		No		No	

De esta tabla se extrae que la mejor opción es utilizar el SBC Raspberry Pi. Su costo alto se justifica con sus altas capacidades de procesamiento y posibilidad de integración. Esta elección se complementa con la siguiente sección, 4.2.2.

4.2.2 Selección de dispositivo de grabación

El dispositivo de grabación es posiblemente el más importante, ya que es la fuente primaria de información para un sistema BRUVS. Actualmente en el CIMAR se utilizan cámaras GoPro, que pueden grabar a una resolución de 1080p a 30 cuadros por segundo. Como un prototipo inicial se tiene un valor marginal de resolución de 720p, pero idealmente la cámara que se vaya a elegir debe cumplir las especificaciones originales. Para realizar una comparación se eligen tres tipos de cámaras. El primer tipo es una cámara compatible con el protocolo CSI, utilizado por el Raspberry Pi. El segundo tipo consiste en una cámara que utiliza el protocolo USB, también manejado por el Raspberry Pi. Por último se incluye una cámara estilo *Action Camera*, que es lo que se utiliza actualmente en los sistemas BRUVS del CIMAR. Esta comparación se presenta en la tabla 4.10.

Tabla 4.10 Características de distintos dispositivos de grabación

Característica	Dispositivo de grabación		
	Cámara Raspberry Pi V1.3	Cámara HD USB	GoPro Hero 6
Resolución de grabación	1080p	1080p	1080p
Cuadros por segundo	30	30	30
Comunicación	CSI-2	USB	HDMI
Costo	\$19.95	\$99.00	\$399.99

En esta comparación se puede observar que estas cámaras cubren un gran rango de precio. A pesar de esto, todas son capaces de grabar en 1080p a 30 cuadros por segundo, que es la necesidad principal del CIMAR. El verdadero punto de peso para elegir una cámara apropiada recae en el protocolo de comunicación. La matriz de evaluación para este dispositivo de grabación se presenta en la tabla 4.11.

Tabla 4.11 Matriz de evaluación para dispositivos de grabación

		Módulo de grabación					
		Rpi Cam V1.3		Cam HD USB		GoPro H6	
Criterio de selección	Peso (%)	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Resolución	40	5	2	3	1.2	4	1.6
Protocolo de comunicación	30	5	1.5	4	1.2	3	0.9
Costo	30	5	1.5	3	0.9	1	0.3
Total puntos		5		3.3		2.8	
Lugar		1		2		3	
Desarrollar		Sí		No		No	

De esta matriz de evaluación se puede extraer que la mejor opción es el módulo de grabación para el Raspberry Pi. Este presenta el menor costo, y es capaz de grabar a la misma resolución que las otras cámaras. Aunque esta cámara no tenga la mejor profundidad de color, se considera suficiente para el desarrollo del prototipo ya que presenta un bajo costo y disponibilidad

en el mercado costarricense. De igual forma, tiene una alta compatibilidad con el Raspberry Pi y la combinación de ambos permite aprovechar los recursos disponibles en este de manera que no sería posible con las otras propuestas para dispositivos de grabación.

4.2.3 Selección de iluminación auxiliar

Actualmente en el CIMAR no se tiene una necesidad inmediata por iluminación auxiliar. Sin embargo, esta se incluye en el prototipo para evidenciar el potencial de expansión que se tiene con este sistema. De igual forma, el método de iluminación que se elija tiene que ser escalable. Es decir, debe ser fácil de aumentar la cantidad de iluminación que se tenga.

Es evidente que se requiere un sistema de iluminación que sea compacto, eficiente y fácil de controlar. Esto descarta muchas opciones, dejando principalmente la opción de usar diodos emisores de luz, o LEDs por sus siglas en inglés. Sin embargo, existen muchos tipos de LEDs para elegir. Tras realizar una investigación, se delimitó a las tres opciones que se presentan en la tabla 4.12. Es necesario que los LEDs que se utilicen sean sencillos de controlar, permitan una iluminación uniforme y no genere ninguna irregularidad en la imagen.

Tabla 4.12 Características de sistemas de iluminación

Característica	Sistema de iluminación		
	LED 5mm	LED SMD	LED SMD DotStar
Enfoque de luz	Sistema de iluminación	No	No
Driver integrado	No	No	Si
Tensión	3.0V	3.0V	5V
Costo	25x \$6.95	10x \$5.95	10x \$9.95

Estas características fueron luego incluidas para la matriz de evaluación presentada en la tabla 4.13.

Tabla 4.13 Matriz de evaluación para el sistema de iluminación

		Sistema de iluminación					
		LED 5mm		LED SMD		LED SMD DotStar	
Criterio de selección	Peso (%)	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Uniformidad de iluminación	40	1	0.4	5	2	5	2
Facilidad de control	20	3	0.6	3	0.6	5	1
Costo	40	5	2	3	1.2	3	1.2
Total puntos		3		3.8		4.2	
Lugar		3		2		1	
Desarrollar		No		No		Si	

De estas opciones, todas pueden operarse a una frecuencia lo suficientemente alta para que no se observe ninguna iluminación irregular en la imagen. Sin embargo, los LEDs de 5mm presentan una fuerte desventaja respecto a la uniformidad de iluminación. Al tener un encapsulamiento que enfoca la luz, se va a tener un punto muy brillante enfocado en el centro de la imagen. Esta desventaja no la tienen los LEDs SMD, que brindan una iluminación más uniforme. Sin embargo, los LEDs SMD deben controlarse mediante un componente adicional, como un MOSFET. La única opción que no requiere de componentes adicionales es los LEDs DotStar, ya que estos incluyen una etapa de control de potencia dentro de su circuito. Para controlarlos, es necesario acudir a la comunicación SPI, pero esto no es mayor problema ya que el Raspberry Pi cuenta con esta característica. Estos LEDs se conectan en cadena, ilustrado en la figura 4.10. En este caso se muestran dos LEDs, pero se puede agregar la cantidad necesaria. En el desarrollo de este proyecto se implementaron 4 LEDs.

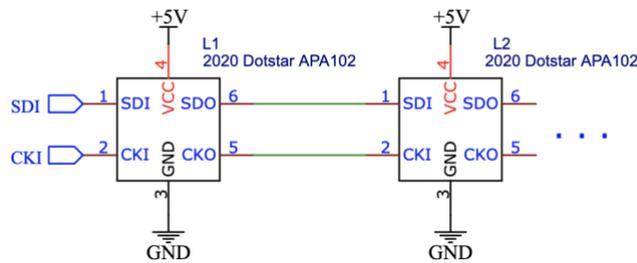


Figura 4.10 Esquema de conexión para LEDs

4.2.4 Selección de sensores de variables

4.2.4.1 Sensor de presión y temperatura

Para la elección del sensor de presión y temperatura se tuvieron que considerar varios aspectos. La decisión principal era la de buscar dos sensores distintos o si se empleaba un único sensor. Si se utilizan dos sensores distintos, se puede conseguir sensores que tengan mejor resolución en sus mediciones. Sin embargo, esto requeriría realizar dos penetraciones a la carcasa, lo que aumenta tanto el costo y la complejidad de manufactura como la posibilidad de fallo. Por esto, se decide emplear un único sensor para medir tanto la presión como la temperatura.

El sensor MS5837 tiene una lista de cualidades que lo hacen el sensor ideal para esta aplicación. Este es un sensor de presión y temperatura, capaz de operar a profundidades de hasta 30 bares, o aproximadamente 300 metros de profundidad. Tiene un empaque de acero inoxidable, lo que lo hace resistente a ambientes corrosivos. Adicionalmente, tiene una resolución de 0.20 mbar, lo que implica que el sensor puede detectar un cambio de hasta 2mm. Este sensor también tiene una resolución de 0.6 °C [22]. Cabe mencionar que un sensor de temperatura dedicado podría tener mejor resolución, pero la ventaja principal de este es su integración. De igual forma la resolución se ajusta a las especificaciones definidas anteriormente.

Otra ventaja de este sensor es que como parte de su proceso de fabricación se realiza una calibración a dos puntos, tanto para la medición de presión como para la medición de temperatura. Estos valores se almacenan en una memoria interna del sensor, donde luego pueden ser accedidos a través del código. La biblioteca implementada para este sensor, desarrollada por BlueRobotics,

realiza el ajuste de los valores medidos utilizando los valores de referencia programados en la fábrica [23].

4.2.4.2 Reloj de tiempo real

Para poder incluir una estampa de tiempo en la información capturada, es necesario tener un dispositivo que pueda guardar la hora cuando la batería principal del sistema no esté conectada. Para esto se utiliza un reloj de tiempo real, o RTC. El RTC que se utiliza es el DS3231 de la compañía Maxim Integrated. Este dispositivo mantiene la hora, minutos y segundos a una precisión de ± 2 minutos por año [24]. Adicionalmente incluye procesamiento de datos para compensar por años bisiestos, meses y días irregulares. Esto reduce la cantidad de procesamiento de información que se requiere por parte del controlador principal, al igual que reduce la posibilidad de error.

Para implementar este módulo es necesario programar la hora a sus registros internos. Esto se puede realizar directamente desde la biblioteca utilizada para este RTC. Se debe conectar el Raspberry Pi a alguna red que tenga acceso a internet, y este automáticamente actualiza la hora del sistema operativo. Luego se transfiere esta hora al DS3231 mediante comandos en la terminal de Python.

4.2.4.3 Sensor de tensión

Como el Raspberry Pi no incluye un ADC para la lectura de señales analógicas, es necesario agregar un módulo adicional. Este módulo se va a utilizar solamente para la medición de tensión en la batería, y de esta forma monitorear su nivel para detener la grabación en caso de que la tensión sobrepase un nivel límite. Por esto, no es necesaria una alta precisión de medición.

Se elige el ADC ADS1115, capaz de medir cuatro canales a 16 bits de resolución [25]. A pesar de ser mucho más de lo que se requiere, se favorece este ADC por su facilidad de acceso y bajo costo. Para la medición de tensión, se utiliza un divisor de tensión conectado directamente a la batería. Se presenta la esquemática en la figura 4.11, donde se observa la proporción de 3:1. Esto significa que el valor de tensión medido en el sensor va a ser aproximadamente 3 veces menor

al valor real de la batería. Sin embargo, los resistores empleados tienen una incertidumbre del 5%. Para tener una mejor aproximación del valor de tensión, se utilizó un multímetro para medir la tensión de batería y la tensión de entrada al ADC. Realizando nuevamente la división con los valores obtenidos, se aproxima la relación de tensión a 3,07.

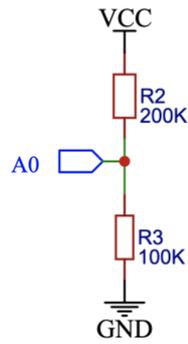


Figura 4.11 Divisor de tensión implementado

4.2.5 Programación del sistema

Para conseguir que todo el sistema electrónico funcione de la forma deseada es necesario escribir un código que integre y ejecute todos los sistemas. Para realizar esto se inicia realizando un diagrama de flujo del funcionamiento del programa. Este diagrama se puede observar en la figura 4.12.

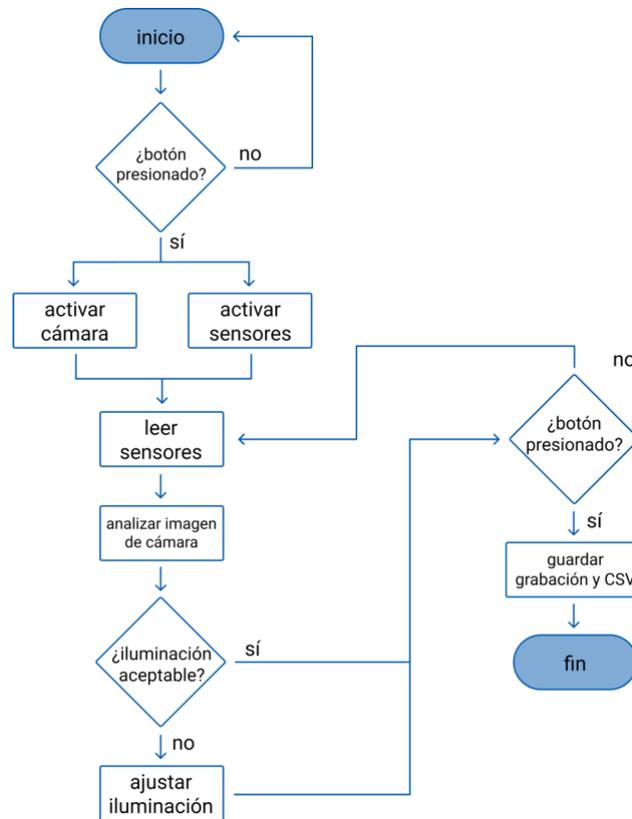


Figura 4.12 Diagrama de flujo de código

Para implementar este código se elige el lenguaje de programación Python. Este es un lenguaje de programación de alto nivel, lo que simplifica la implementación del código. Adicionalmente, se tiene una amplia integración tanto en el Raspberry Pi como en el ámbito de sensores. De esta forma, se puede controlar tanto la cámara y su funcionamiento como los pines de propósito general para comunicarse con los sensores y dispositivos periféricos.

Este código consiste en una sección de configuración y una sección que se ejecuta en bucle. En la sección de configuración se realizan todas las tareas pertinentes a la inicialización de los sensores y componentes periféricos, que consiste en el sensor de presión y temperatura MS5837, el módulo de tiempo real DS3231, los LEDs DotStar, el ADC ADS1115, y el interruptor momentáneo acompañado por el LED de estatus. La conexión para el interruptor y el LED de estatus se observa en la figura 4.13. Adicionalmente, se incluir las bibliotecas necesarias para el funcionamiento del código, que incluye el manejo de los pines de propósito general y los

protocolos de comunicación necesarios como I2C y SPI. Se debe también incluir la biblioteca que permite controlar las funciones del módulo de cámara.

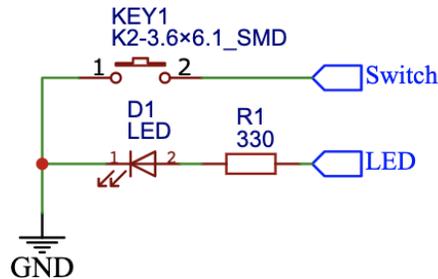


Figura 4.13 Esquema para conexión de interruptor y LED de estatus

Luego se procede a definir las funciones para realizar tareas específicas en el código, y de esta forma simplificar su ejecución. A continuación se explican las funciones principales definidas en el código.

- *setBrightness()*: Esta función es la encargada de ajustar la iluminación auxiliar. Para esto, se implementa un sencillo sistema de visión. Este toma una imagen en forma de una matriz de tres dimensiones de la secuencia del video, y procede a calcular la iluminación promedio en la misma. Es necesario mencionar que se tiene una profundidad de color de 8 bits, por lo que el valor máximo de brillo en una matriz puede ser de 255. Se realiza un análisis para determinar el brillo promedio mínimo donde se produce una imagen aceptable, y se fija en un valor de 100. Valores de brillo por debajo de este valor producen imágenes muy oscuras. Luego, se calcula el mínimo donde no se observa una imagen del todo, que corresponde a un valor de brillo de 20. Este se define como el punto de iluminación máxima. Para calcular la iluminación auxiliar, se realiza una recta entre estos dos puntos, y se declara un valor de iluminación de 0 al 100. En la figura 4.14 se observa el comportamiento implementado por elaboración propia. Por último, se aplica un control de la tasa de cambio de los LEDs, para no generar cambios muy drásticos de iluminación en la grabación.



Figura 4.14 Curva de brillo contra valor de iluminación de LEDs

- *readSensors()*: En esta función se realizan todas las operaciones necesarias para la lectura de todos los sensores. Para este prototipo, se leen todos los sensores disponibles para asegurar la mayor cantidad posible de datos. Estos incluyen:
 - Fecha y hora
 - Tensión de batería
 - Presión
 - Temperatura Externa
 - Temperatura Interna
 - Nivel de iluminación de los LEDs

Adicionalmente, se verifica que el nivel de batería esté por encima del mínimo requerido para asegurar el funcionamiento del sistema. De lo contrario, se activa una variable para detener la grabación de inmediato y evitar la pérdida de datos.

- *initLogging()*: Esta función inicia el proceso de grabación, llamando a la función necesaria para activar el módulo de cámara.
- *closeLogging()*: Esta función se encarga de todos los procesos que se deben realizar al finalizar el proceso de grabación y toma de datos. Dentro de esta función se genera el

archivo CSV, y se coloca dentro de él la lista de datos que se ha ido construyendo a lo largo de la duración de la grabación. Se agrega una cabecera a este documento que incluye el día y la hora a la que se inició la grabación, y una especie de pie de página indicando si se detuvo la grabación por batería baja o por la actuación del botón. Adicionalmente, se detiene la grabación y se guarda el video. Dentro de esta función se hace un llamado a otra función para convertir el video de formato .h264 a formato .mp4, para facilitar su análisis.

Por último, se tiene el bucle principal. Este corre en un ciclo cada 0,2 segundos, y se encarga de ejecutar las funciones anteriormente descritas. Cada 5 segundos se llama la función de leer los sensores, que son agregados a una lista para luego ser convertida a un CSV. Esta información también es sobrepuesta en la captura de video. Cada segundo se llama la función para ajustar la iluminación auxiliar. También se revisa en cada ciclo si se ha presionado el botón de iniciar o detener la grabación, para llamar a la función pertinente de iniciar o detener el proceso de toma de datos.

4.2.6 Almacenamiento y alimentación de energía

Para el almacenamiento de energía del dispositivo se delimitaron las opciones a solamente dos. Estas son baterías de polímero de litio y las baterías de iones de litio. La diferencia entre estas es muy poca, consistiendo solamente del precio y la densidad energética. Las baterías de polímero de litio normalmente tienen un menor costo, pero suelen tener menos capacidad de almacenamiento energético por unidad de volumen. Estas comparaciones se pueden observar en la tabla 4.14. Las características para estas baterías fueron tomadas del sitio web para la distribuidora electrónica CRCibernética.

Tabla 4.14 Comparación de características de baterías

	Polímero de Litio (LiPo)	Iones de Litio (Li Ion)
Capacidad (Wh)	9.25	9.25
Volumen (cm ³)	26.52	17.13
Precio (\$)	14.95	9.95

En este caso se puede observar que el precio de una batería de polímero de litio tiene un costo mayor que la de iones de litio por la misma capacidad. Aunque este normalmente no es el caso, esto facilita la decisión para la selección de la batería de iones de litio. La única desventaja de esta es su paquete cilíndrico, que dificulta la optimización de instalación, pero no se considera impactante para esta aplicación.

Según [26], el consumo máximo de un Raspberry Pi 4 puede llegar a los 1.2 Amperios. A 5 Volts, esto equivale a un consumo de 6 Watts. Las especificaciones del cliente requieren de al menos 2 horas de grabación, por lo que se requiere una batería de al menos 12 Watts hora. Por esto es necesario utilizar 2 baterías de iones de litio, para un total de aproximadamente 18.5 Watts hora.

Es necesario también agregar una etapa de acondicionamiento de energía, ya que el Raspberry Pi debe ser alimentado con 5 Volts. Como se utilizan dos celdas, estas se pueden conectar en serie y utilizar un convertidor buck. La segunda opción es conectar las baterías en paralelo y utilizar un convertidor boost. Según los resultados de las pruebas en [27], un convertidor buck tiene mayor eficiencia. Por este motivo, se elige un módulo buck basado en el MP1584.

4.3 Integración y diseño de prototipo

4.3.1 Integración de sistemas

Para la integración exitosa de ambos sistemas es necesario diseñar piezas adicionales. Estas piezas funcionan de estructura para el sistema electrónico, y proveen el interfaz entre el diseño mecánico y el electrónico. La estructura diseñada consiste de tres piezas. El soporte para el tapón es una pieza que se coloca en el tapón de limpieza de PVC. Esta pieza se adhiere al tapón, para proveer una estructura para soportar las piezas adicionales. Estas piezas adicionales consisten en la base para el Raspberry Pi y la base para la cámara. La base para el Raspberry Pi es la pieza más grande, y está diseñada para sujetar a este SBC, las baterías para alimentar al sistema y todos los dispositivos periféricos que se requieren para el funcionamiento del sistema electrónico. Por último se tiene la base para la cámara. Esta es la pieza circular que se coloca al frente del ensamblaje, y se encarga de proveer una base para la cámara y el sistema de iluminación auxiliar. En la figura 4.15 se puede observar una vista explosionada del ensamblaje de este diseño. Adicionalmente, en la figura 4.16 se presenta un modelo del ensamblaje del sistema.

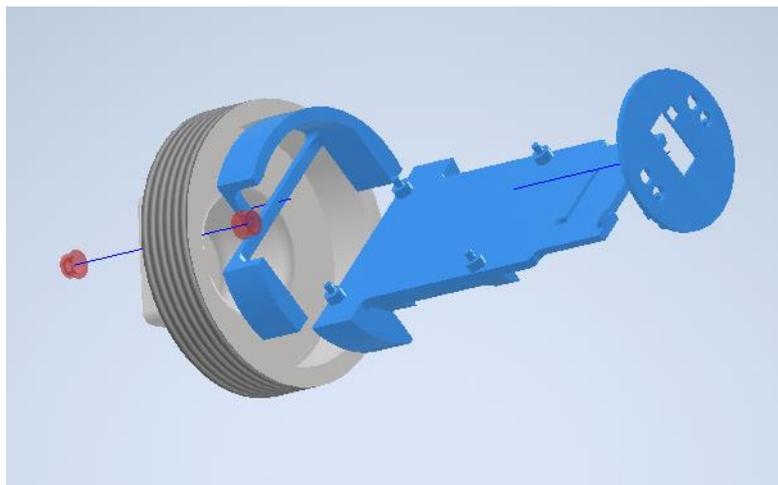


Figura 4.15 Vista explosionada del ensamblaje

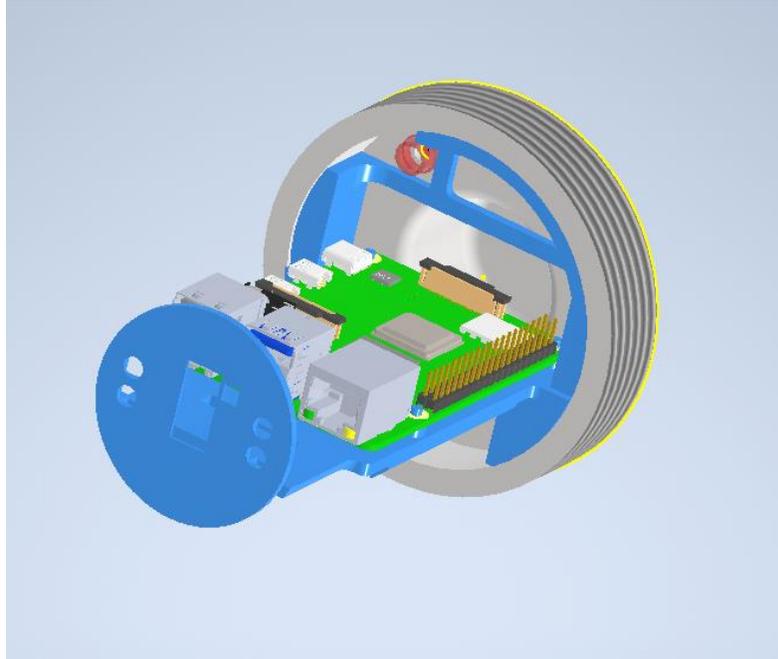


Figura 4.16 Modelo del ensamblaje

En estos modelos, se presenta en azul las piezas que fueron descritas anteriormente. También se pueden observar en rojo las piezas diseñadas para el encapsulamiento del sensor. Para manufacturar estas piezas se utiliza manufactura aditiva, también conocido como impresión 3D. Este método permite prototipado rápido de diseños personalizados, por lo que se tiene más flexibilidad a la hora de diseñar piezas. El material utilizado es el ácido poliláctico, o el PLA. Este material es de bajo costo y es el filamento más común para aplicaciones de manufactura aditiva. La desventaja principal de este material es que tiene una temperatura de deformación de 60°C. Por esto, es necesario que la temperatura de los componentes electrónicos no supere este valor. Esto se debe verificar más adelante en las pruebas del dispositivo.

4.3.2 Diseño final

El diseño final de este prototipo consiste en la integración de todos los sistemas descritos anteriormente. Estos son el sistema electrónico, el sistema mecánico, y las piezas que permiten la integración de los mismos. En la figura 4.17 se presenta una vista explosionada del ensamblaje final del prototipo. Aquí se puede observar el Raspberry Pi, representando el sistema electrónico montado en la base donde se coloca el sistema electrónico. Se puede observar la estructura

principal de la carcasa, con la ventana de acrílico. También se puede observar el tapón con la adición de la estructura de soporte incluida para acoplarse a la base del sistema electrónico. Todos los planos para las piezas no estándar se presentan en el apéndice C, y la esquemática final en el apéndice B.

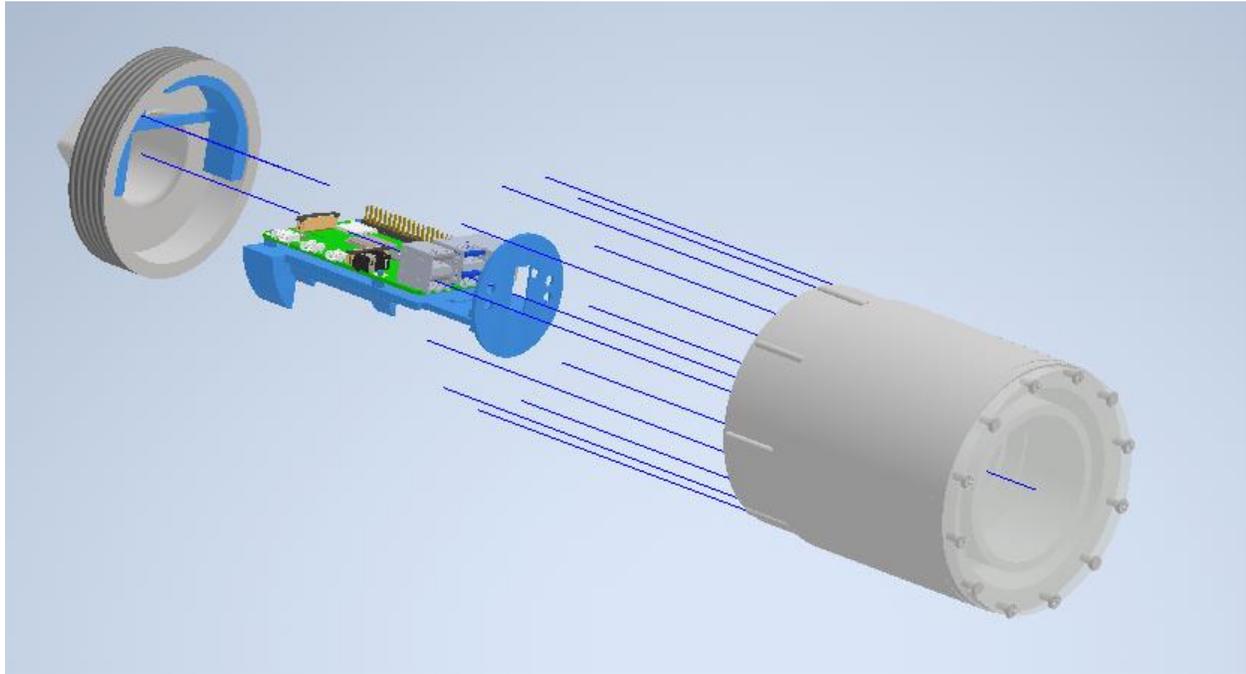


Figura 4.17 Modelo de ensamblaje final del prototipo

Para ensamblar este prototipo, se coloca la base del sistema electrónico en la tapa. Luego, se enrosca este ensamblaje a la estructura principal. Para este diseño se recomienda utilizar un alicate de extensión u otra herramienta que permita ajustar el tapón con más facilidad.

Este prototipo no presenta una ventaja para el CIMAR en el aspecto de poder funcionar a mayores profundidades. Los puntos donde sí resalta es en costo y en posibilidad de expansión. La disponibilidad de pines de propósito general del Raspberry Pi y su versatilidad para ser programado permiten la creación de una plataforma con gran posibilidad de expansiones. Por motivos de costo y tiempo, se redujo la integración de sensores a uno de temperatura y presión. Sin embargo, se ha evaluado la posibilidad de incluir sensores más avanzados, como un sensor de oxígeno disuelto o de salinidad. Con el sistema propuesto en este documento, la implementación

de estos sensores se podría hacer de forma rápida y sencilla. Adicionalmente, al tener acceso al código que manipula estos datos, se podrían implementar funciones de pre-procesamiento de datos para obtener resultados más sencillos de analizar. Estos pueden incluir promedios, filtros de media móvil o virtualmente cualquier operación matemática que se requiera hacer.

Otra ventaja adicional que tiene este prototipo es que el sistema combina el proceso de toma de datos y de toma de imagen. De esta forma, se puede utilizar los datos tomados y superponerlos en la imagen, de forma gráfica o numérica. Esto facilita el análisis posterior ya que se tiene toda la información integrada en un único archivo de video. También se puede utilizar este sistema para optimizar la iluminación auxiliar. Leyendo la imagen de la cámara, se puede calcular la iluminación necesaria y encender los LEDs a este valor. Al no ser un estado binario, es decir, al no estar los leds solamente encendidos completamente o apagados, se puede reducir el consumo energético mientras todavía teniendo la iluminación necesaria para capturar videos que puedan ser de utilidad para el CIMAR. Mientras que este primer prototipo no presenta una ventaja de poder alcanzar mayores profundidades, es una prueba de concepto que permite un punto de partida para realizar un diseño capaz de soportar mayores profundidades.

4.4 Diseño de pruebas de concepto

4.4.1 Prueba de funcionamiento del dispositivo electrónico

Objetivo: Determinar la estabilidad del sistema electrónico y su consumo promedio de energía.

Variables a medir:

- Fallas del sistema
- Miliamperios-hora consumidos
- Temperatura interna

Factores de influencia: Temperatura ambiental, calidad de las baterías, ventilación

Descripción de la prueba: En esta prueba se va a verificar el funcionamiento estable del sistema electrónico, evaluando tanto el video como el archivo CSV obtenido. De esta forma se puede corroborar que los sensores están funcionando y la grabación es exitosa de forma simultánea. Para realizar esta prueba, se va a colocar el sistema electrónico dentro de la carcasa sin inmersión por una cantidad de tiempo preestablecida. En este caso se van a realizar 3 pruebas de 2 horas de grabación continua, y 3 pruebas de 3 horas de grabación. Las pruebas de 2 horas responden a las necesidades del CIMAR, ya que esta es la cantidad de tiempo habitual para un muestreo. Las pruebas de 3 horas se utilizan para verificar la funcionalidad en plazos de tiempo mayores. Al finalizar la etapa de medición, se deben cargar las baterías utilizando un método de carga de corriente constante y tensión constante (CC y CV por sus siglas en inglés). El cargador que se utilice debe medir la cantidad de miliamperios-hora que se requieren para cargar la batería. De esta forma, se pueden realizar cálculos de consumo promedio del dispositivo. Finalmente, es necesario revisar el archivo CSV generado para verificar que la temperatura interna no haya superado el punto de deformación del PLA de 60°C [28].

Resultados esperados: Se espera obtener un video consecutivo con la duración del tiempo de prueba, y un archivo CSV con registros cada 5 segundos de los sensores incluidos. Estos registros deben venir acompañados de la hora, minuto y segundo al que fueron tomados. Adicionalmente se

espera obtener 2 valores de miliamperios-hora, uno para cada celda utilizada, que permitan hacer cálculos del consumo promedio del dispositivo.

4.4.2 Prueba de hermeticidad de carcasa

Objetivo: Determinar la resistencia real de la carcasa a la presión subacuática

Variables a medir:

- Hermeticidad

Factores de influencia: Temperatura ambiental, densidad del agua, corrientes marítimas, viento.

Descripción de la prueba: En esta prueba se va a verificar la capacidad del dispositivo a resistir el ingreso de agua a distintas profundidades subacuáticas. Como se va a seguir la norma IEC 60529, es necesario seguir varias especificaciones para la prueba. Para obtener una clasificación de IPX8, se debe superar la profundidad de un metro por más de 30 minutos sin que ingrese líquido de manera que perjudique el funcionamiento del sistema. Se establecieron pruebas a dos profundidades distintas, 3 metros y 10 metros. La profundidad de 3 metros busca evaluar el funcionamiento general de la carcasa, mientras que la profundidad de 10 metros responde directamente a las especificaciones mínimas de la carcasa establecidas anteriormente. Se utiliza además un tiempo de inmersión de 40 minutos. De esta forma se puede seguir la norma, pero al no ser un tiempo tan extenso se pueden maximizar la cantidad de pruebas realizadas en un día en el campo.

Para realizar esta prueba, se debe sumergir la carcasa sin el sistema electrónico a las profundidades establecidas. Deben realizarse 4 inmersiones a 3 metros de profundidad y 4 inmersiones a 10 metros de profundidad por 40 minutos en cada caso. Adicionalmente, entre cada inmersión se debe abrir la carcasa, extraer el o-ring, secarlo y volverlo a colocar. De esta forma se simula el proceso de extracción del sistema electrónico para iniciar o detener la grabación y el mantenimiento necesario. Se debe verificar que no haya ingresado agua, realizando una inspección

visual de si hay líquido al interior de la carcasa. Todo se debe anotar en una tabla que contenga la duración de la prueba y si ingresa agua o no.

Resultados esperados: Se espera obtener una tabla de pruebas, especificando la profundidad, duración exacta de la prueba y una indicación de si la carcasa resiste al agua. Se espera una tasa de aprobación del 100%.

4.4.3 Prueba completa de sistema electrónico y carcasa

Objetivo: Determinar la funcionalidad total del prototipo desarrollado

VARIABLES A MEDIR:

- Temperatura
- Presión subacuática

Factores de influencia: Temperatura ambiental, temperatura subacuática, presión atmosférica, densidad del agua, corrientes marítimas, viento.

Descripción de la prueba: En esta prueba se verifica el funcionamiento total del dispositivo. Se realiza de forma idéntica a la prueba anterior, pero incluyendo el sistema electrónico al interior. De esta forma se evalúa el funcionamiento en conjunto de ambos subsistemas. Como el funcionamiento de la carcasa ya se había verificado anteriormente, se realizan solamente 2 pruebas a 3 metros y 2 pruebas a 10 metros de profundidad. Se debe anotar de igual forma la duración exacta de la prueba, especificar la profundidad y si el prototipo pasa la prueba o no.

Resultados esperados: Se espera obtener una tabla de pruebas, especificando la profundidad, duración exacta de la prueba y una indicación de si la carcasa resiste al agua. Adicionalmente se espera un video de la duración de la prueba, con un archivo CSV conteniendo toda la información recolectada durante la misma. Se espera una tasa de aprobación del 100%.

Capítulo 5: Resultados y Análisis

5.1 Prueba de funcionamiento del dispositivo electrónico

5.1.1 Resultados

Se realizó la prueba descrita en la sección 4.4.1, y se tabularon los resultados en la tabla 5.1. En esta se presenta la duración de cada prueba realizada y si el dispositivo pasa la totalidad de la prueba sin problemas que causen la interrupción del funcionamiento. El cargador al que se tenía acceso solamente tenía la capacidad de cargar una batería a la vez, por lo que se presenta la cantidad de mAh cargado a cada celda, y luego un promedio. Adicionalmente se realiza un cálculo de consumo promedio de mAh por hora, dividiendo la cantidad de mAh por la duración de la prueba en horas.

Tabla 5.1 Características de pruebas realizadas a subsistema electrónico

Prueba	Hora inicio (±0:01)	Hora fin (±0:01)	Duración (hh:mm ±0:02)	Pasa	Energía celda 1 (±1 mAh)	Energía celda 2 (±1 mAh)	Energía promedio (±1 mAh)	Consumo promedio (mAh/h)
1	12:15	14:17	2:02	Si	893	862	878	432 ± 7
2	2:22	16:28	2:06	Si	876	865	871	415 ± 7
3	7:57	10:00	2:03	Si	837	834	836	408 ± 7
4	16:50	19:58	3:08	Si	1546	1551	1549	494 ± 5
5	17:51	20:54	3:03	Si	1716	1789	1753	575 ± 5
6	11:15	14:15	3:00	Si	1171	1173	1172	391 ± 5

Durante la ejecución de las pruebas se notó que la carcasa estaba notablemente más caliente al final de las pruebas que al inicio de estas. Las pruebas se realizaron en una ventana, sin embargo, para las pruebas 4 y 5 esta ventana estaba cerrada lo que disminuyó la cantidad de ventilación. Las mediciones de temperatura para las pruebas se presentan en la figura 5.1.

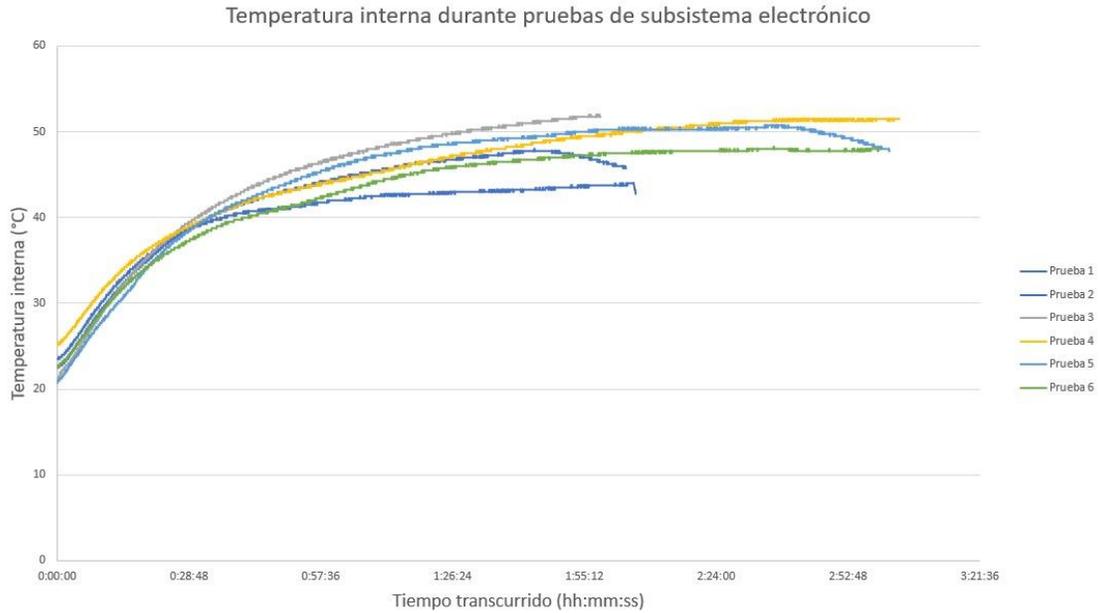


Figura 5.1 Temperatura interna medida durante pruebas de sistema electrónico

5.1.2 Análisis

Se analizaron los archivos generados, tanto el CSV como el video para verificar que estos fueran guardados adecuadamente. En todos los casos se obtuvo un CSV con todos los datos tomados y un video con los datos de temperatura y presión sobrepuestos. Se verificó también que la temperatura no alcanzara los 60 °C, ya que este es el punto donde las piezas de PLA se empiezan a deformar. Esto se puede corroborar en la figura 5.1, donde se puede observar las distintas mediciones de temperatura tomadas durante la ejecución de cada prueba. Las pruebas realizadas al sistema electrónico se consideran exitosas ya que el dispositivo logró grabar y tomar datos por la duración de todas las pruebas.

Del proceso de carga de las baterías, se puede notar una variación significativa para el consumo promedio. Se utiliza este valor ya que es independiente a la duración de la prueba y facilita la comparación entre las pruebas de distinta duración. Se puede notar, sin embargo, que hay un aumento en el consumo para las pruebas 4 y 5. Esto se podría atribuir a la falta de ventilación que había alrededor de la carcasa, lo que causó que se calentara más de lo habitual. Esto se puede verificar en la figura 5.1, donde se ve una temperatura mayor en el caso de las

pruebas 4 y 5. Este aumento pudo haber generado pérdidas adicionales en el sistema al calentar las baterías y aumentar su resistencia interna. Dado que el uso habitual de este dispositivo va a ser en el agua, el calor se va a disipar mucho más fácilmente.

Para tener un aproximado conservador del consumo promedio del dispositivo, se utiliza el mayor valor del consumo medido en las pruebas. Este es el valor de 575 mAh por hora. Como las baterías se conectan en serie, la capacidad en miliamperios hora es 2500. Para calcular la duración teórica máxima, se tiene:

$$\frac{2500mAh}{575 \pm 5 mAh/h} = 4.35 \pm 0.03 h \quad (5.1)$$

Este resultado se puede redondear hacia abajo, para permitir compensar por algún pico imprevisto en procesamiento. Por ende, se calcula que la duración teórica máxima de grabación es de aproximadamente 4 horas. Este resultado se calcula para todas las pruebas, y se presenta en la figura 5.2. En esta, se observa las duraciones estimadas para el consumo de cada prueba, con una línea en aproximadamente 5.6 horas que representa el promedio de las pruebas. Este valor solo es una referencia, ya que existe cierta desviación de los datos. Como duración máxima se toma el valor de 4 horas, ya que este garantiza que en todas las grabaciones se va a cumplir esta duración.

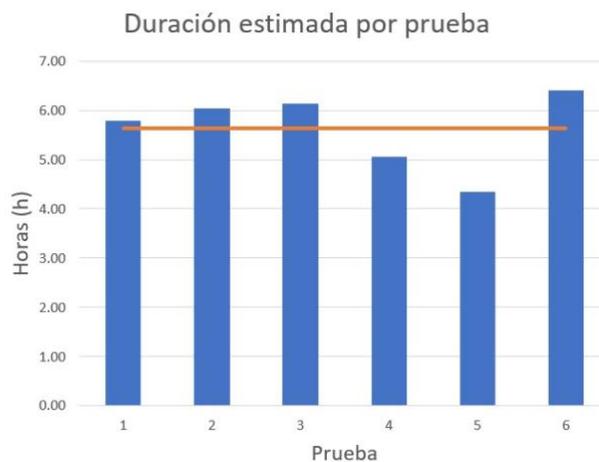


Figura 5.2 Duración estimada para el consumo energético de cada prueba

5.2 Prueba de hermeticidad de carcasa

5.2.1 Resultados

En esta sección se muestran los resultados para la prueba descrita en la sección 4.4.2. Estas pruebas fueron realizadas en una embarcación en la región del golfo de Nicoya, en el costado suroeste de la isla San Lucas. Se realizaron las pruebas a lo largo de dos días que fue el tiempo que se tenía disponible. La hora a la que se iniciaba y se concluía cada prueba se anotaba. Esta información y los resultados de esta prueba se presentan en la tabla 5.2. Aquí se tiene la duración de la prueba y la profundidad aproximada. Como se tenían dos carcasas, se realizaron pruebas simultáneamente para obtener más datos, y evaluar la repetitividad del uso. Adicionalmente se aprovechó el tiempo en campo, y se realizaron más de las 8 inmersiones estipuladas anteriormente.

Dado a las limitaciones del equipo utilizado, no se podía calcular la profundidad con gran exactitud. Se utilizó una cuerda de 12 metros de longitud, con un peso en un extremo donde se sujetaba la carcasa. Se medía la distancia requerida, 3 o 10 metros, y se marcaba el punto. Luego se sujetaba la cuerda de tal forma que este punto quedaba en la superficie del agua. Para determinar si ingresaba agua al interior de la carcasa, se colocaron toallas de papel dentro de esta. Al final de cada prueba, se abría la carcasa y se verificaba que las toallas no estuvieran húmedas. Se realizaba una inspección visual de los puntos de unión, incluyendo la ventana de acrílico con la reducción 3x2”, la unión de PVC y el acople de limpieza. Si no se observaban gotas se declaraba el éxito de la prueba.

Tabla 5.2 Características de pruebas realizadas a carcasa

Prueba	Hora inicio (±0:01)	Hora fin (±0:01)	Duración (±0:02)	Profundidad	Pasa
1	10:06	10:47	0:41	3m	Si
2	10:56	11:38	0:42	3m	Si
3	9:38	10:20	0:42	3m	Si
4	9:39	10:20	0:41	3m	Si
5	10:27	11:07	0:40	10m	Si
6	10:27	11:08	0:41	10m	Si
7	12:14	12:57	0:43	10m	Si
8	1:07	1:50	0:42	10m	Si
9	1:07	1:50	0:42	10m	Si
10	12:16	12:57	0:41	10m	Si
11	13:05	13:45	0:40	10m	Si
12	14:11	14:53	0:42	10m	Si

Durante todas estas pruebas, se tuvo variabilidad en corriente y en oleaje. Las corrientes fuertes afectaban las pruebas ya que empujaban a las carcasas hacia un lado, causando que subieran ligeramente de la profundidad original. Este fue el caso para las pruebas 2,5,6 y 7. La variabilidad en oleaje causaba que toda la embarcación subiera y bajara, generando movimientos verticales en las carcasas. Esto sucedió más notablemente en las pruebas 8 y 9.

5.2.2 Análisis

De estas pruebas se puede extraer que la carcasa diseñada funciona de manera aceptable a una profundidad de 3 metros y 10 metros. Dado el cumplimiento de las pruebas diseñadas según la norma IEC 60529, se podría dar una clasificación de IPX8 a este dispositivo. Durante la ejecución de las pruebas la carcasa fue fácil de usar. Se utilizó un alicate de extensión para abrir y cerrar la carcasa, lo cual permitía acceder al dispositivo electrónico de forma simple.

5.3 Prueba de sistema electrónico y carcasa

5.3.1 Resultados

En la tabla 5.3 se presentan los resultados de la prueba descrita en la sección 4.4.3. Se puede observar además que se realizó una prueba adicional a las 4 pruebas realizadas originalmente. Se aprovechó esta oportunidad para tener más pruebas del sistema funcional.

Tabla 5.3 Características de pruebas finales realizadas

Prueba	Hora inicio (±0:01)	Hora fin (±0:01)	Duración (±0:02)	Profundidad	Pasa
1	10:06	10:47	0:41	3m	Si
2	10:56	11:38	0:42	3m	Si
3	12:16	12:57	0:41	10m	Si
4	13:05	13:45	0:40	10m	Si
5	14:11	14:53	0:42	10m	Si

Adicionalmente, se extrajeron los datos de presión y de temperatura tomados durante las pruebas. Estos se graficaron sobre un mismo plano y se presentan en las figuras 5.3 y 5.4, correspondiendo a la profundidad y la temperatura respectivamente. Para la gráfica 5.3 fue necesario realizar cálculos de profundidad, lo que se explica en la sección 5.3.2 respecto al análisis de resultados.

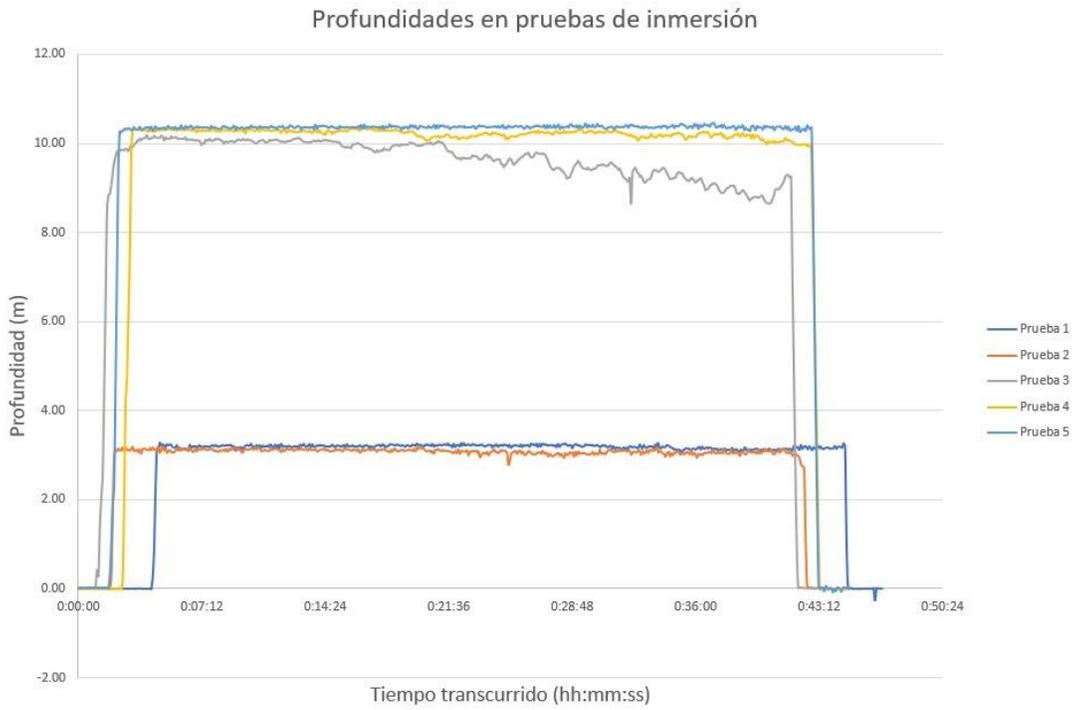


Figura 5.3 Resultados de profundidad calculados para las pruebas de inmersión

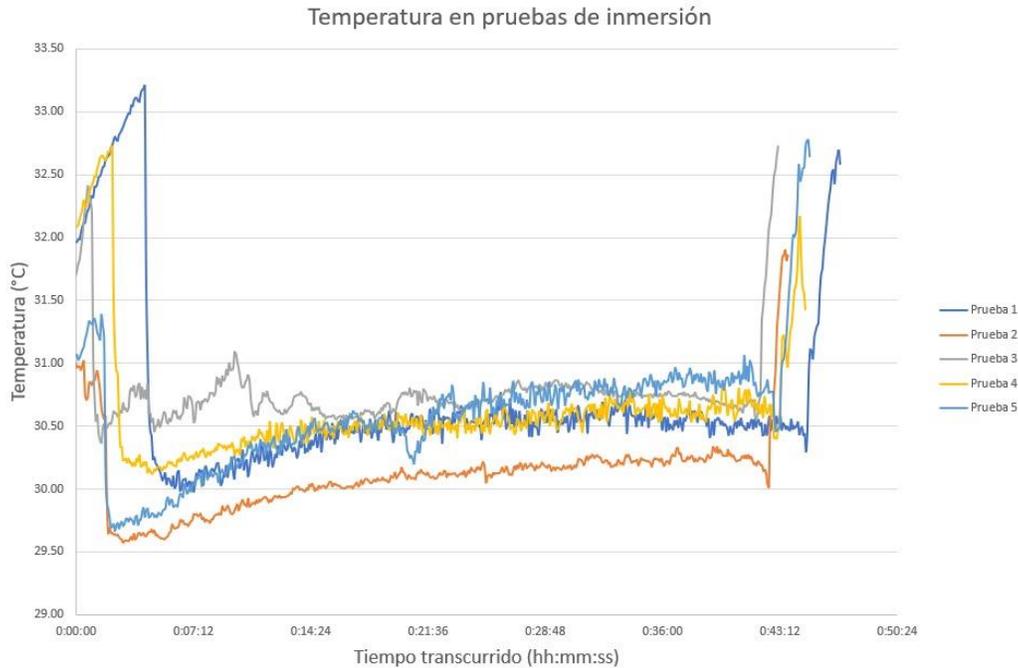


Figura 5.4 Resultados de temperatura obtenidos para las pruebas de inmersión

5.3.2 Análisis

Para estas pruebas se extrajeron todos los archivos CSV generados por el dispositivo para ser analizados. De estos se extrajeron los datos que normalmente se analizarían por el CIMAR, los datos de temperatura y presión subacuática. Los videos también fueron analizados, pero como el agua estaba muy turbia durante las pruebas no se observó nada de mayor interés. Una imagen capturada a 3 metros de profundidad, durante la prueba de validación 1, se presenta en la figura 5.5. En esta se puede observar el sistema utilizado para realizar las pruebas. Se tiene una abrazadera de manguera para sujetar a la carcasa y una cadena para servir de peso. También se puede observar la turbidez del agua durante las pruebas. En la figura 5.6 se presenta una captura del video que se generó durante la prueba de inmersión 1, y en la figura 5.7 para la prueba de inmersión 3. Se puede observar la medición de temperatura y de presión en la parte superior de la imagen.



Figura 5.5 Imagen de dispositivo durante prueba de validación 1



Figura 5.6 Imagen capturada por el dispositivo en prueba de validación 1

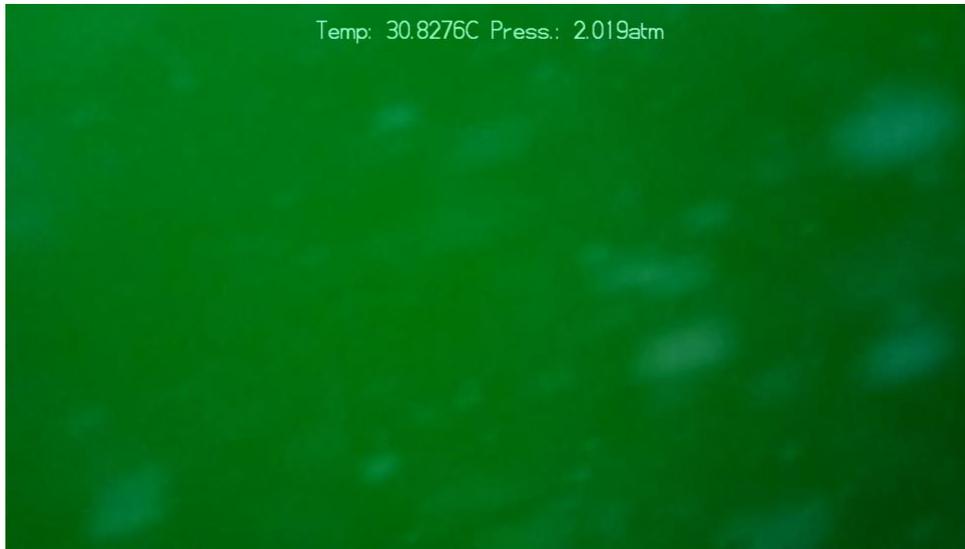


Figura 5.7 Captura de grabación durante prueba de validación 3

Para el análisis de datos extraído fue necesario acudir al programa Microsoft Excel. Este programa facilita la manipulación de archivos CSV, tanto para realizar operaciones matemáticas con los datos como para crear gráficas basadas en los mismos. Primero se analizó la información de presión. Esta se brinda en atmósferas (atm), por lo que debe convertirse a Pascales. Se utiliza la relación:

$$1 \text{ atm} = 101.325 \text{ kPa} \quad (5.2)$$

Habiendo convertido todos los datos a Pascales, se procede a realizar los cálculos de profundidad basada en presión. Para esto, se utiliza la ecuación 4.2:

$$P = \rho gh \quad (4.2)$$

Es importante clarificar que esta ecuación no contempla la presión atmosférica, por lo que es necesario compensar por esto. Dado que la presión atmosférica varía mucho, se toma el primer valor medido por el sensor como la presión atmosférica en el momento de prueba. La profundidad se calcula para cada medición obtenida:

$$h = (P - P_i) / \rho g \quad (5.3)$$

Los resultados de estos cálculos para todas las pruebas de validación se grafican en la figura 5.6. Adicionalmente, se grafica la temperatura medida para todas las pruebas en la figura 5.7. Esto se realizó para todas las pruebas. En las figuras 5.8 y 5.9 se presentan aislados los resultados para la prueba de inmersión 3 para facilitar su análisis.



Figura 5.8 Resultados de profundidad calculados para la prueba de inmersión 3



Figura 5.9 Resultados de temperatura obtenidos para la prueba de inmersión 3

En estas figuras se puede corroborar que la profundidad aproximada medida para las pruebas si fue válida. Se puede observar en la figura 5.6 que la profundidad del dispositivo se mantuvo aproximadamente en los 3.2 metros de profundidad para las primeras pruebas, y de aproximadamente 10.2 metros para las pruebas 3, 4 y 5. En el caso de la prueba de inmersión 3 a 10 metros, se puede ver que al inicio de la prueba la profundidad si llegó a los 10 metros, pero durante la ejecución de esta se observan los efectos de la corriente donde se empuja el dispositivo y se reduce ligeramente la profundidad. Esto solo sucedió en la tercera prueba.

Para las gráficas de temperatura, presentada en la figura 5.7, se puede observar comportamientos un poco irregulares. Los picos que se observan al inicio y al final de las gráficas representan los momentos donde el dispositivo se tenía afuera del agua, donde la temperatura era mayor. En ambas gráficas se observa un comportamiento ruidoso en los datos. Esto se puede atribuir a la resolución de ± 0.6 °C. Los datos se podrían procesar con un filtro de media móvil para tener datos con menor ruido. Sin embargo, se presentan de esta manera para tener mayor transparencia de la información obtenida. En la curva de la figura 5.9, se observan picos en temperatura más drásticos. Tras consultarlo con el investigador Espinoza, se confirma que este es

un comportamiento normal. Esto sucede debido a corrientes acuáticas de distintas temperaturas que cruzan por el punto donde se están realizando las mediciones.

Con estos resultados, se puede observar que el prototipo es exitoso en realizar mediciones de presión y temperatura a profundidades de hasta 10 metros. También logra capturar videos con esta información sobrepuesta por hasta 3 horas, con capacidad de batería para un funcionamiento de hasta 4 horas.

5.4 Especificaciones finales

Tras el análisis de los resultados de las pruebas descritas en secciones anteriores, se pueden definir las especificaciones finales del dispositivo realizado. Estas se presentan en la tabla 5.4.

Tabla 5.4 Lista de especificaciones finales

Número	Métrica	Unidad	Valor(es)
1	Resolución de grabación	p (píxeles)	720, 1080
2	Duración de grabación	h	4
3	Capacidad de batería	Wh	18.5
5	Profundidad máx. de operación	m	10
6	Sensibilidad, profundidad	Pa	20
7	Sensibilidad, temperatura	°C	0.6
8	Protocolos de comunicación		SPI, I ² C, Serial, USB, 1-Wire
9	Iluminación	binario	Sí

El prototipo creado y sus componentes se pueden observar en las figuras 5.10 y 5.11. Estas corresponden al diseño mecánico y electrónico respectivamente. Por último, se presenta el prototipo ensamblado en la figura 5.12.

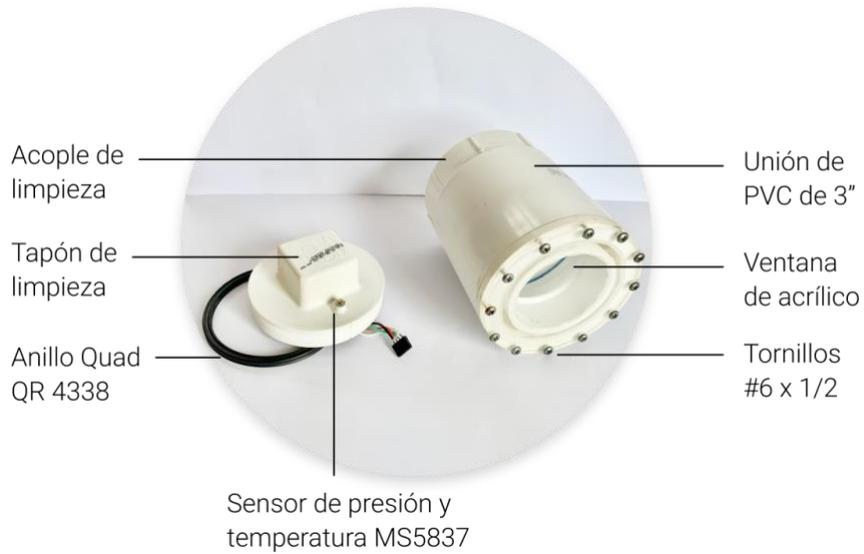


Figura 5.10 Componentes de sistema mecánico

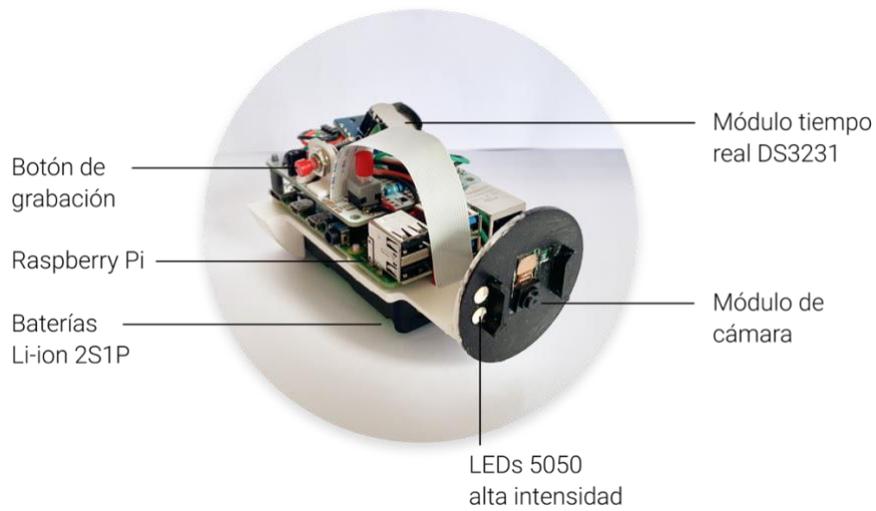


Figura 5.11 Componentes de sistema electrónico

El diseño de este dispositivo cuenta con las características necesarias para ser asignado la clasificación de IPX8 según la norma IEC 60529. Sin embargo, esto no significa que el diseño realizado obtiene esta clasificación. Para esto, es necesario realizar las pruebas estandarizadas utilizando equipo de prueba diseñado para este propósito.



Figura 5.12 Prototipo final ensamblado

Las limitaciones que se tienen actualmente con este dispositivo consisten principalmente en la profundidad máxima de operación y en la cantidad de sensores. La limitante de profundidad se puede atribuir principalmente al sello en el acople de limpieza. En este diseño, este es el punto más débil que tiene la estructura de la carcasa. La otra limitación es la resolución de temperatura del sensor implementado. La sensibilidad de $\pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ se puede mejorar en una futura iteración del diseño. Utilizando un sensor de temperatura dedicado podría permitir la toma de mediciones con mayor precisión. Sin embargo, como un prototipo inicial ambas limitaciones se consideran aceptables.

Capítulo 6: Análisis económico

En este capítulo se presenta un análisis económico y una lista de los componentes utilizados en el desarrollo del prototipo final. Para realizar un análisis económico de este proyecto es necesario evaluar los recursos utilizados para su elaboración. Dada la naturaleza investigativa del CIMAR, no se pretende obtener una ganancia monetaria con este proyecto. Este análisis cubre principalmente los gastos incurridos durante la ejecución del proyecto en la forma de recursos utilizados.

El principal recurso implementado es el computacional. Este se utilizó para investigar y diseñar el prototipo descrito en las secciones interiores. El programa que se utilizó para el diseño del sistema mecánico es Inventor, desarrollado por Autodesk. Esta compañía provee licencias a un costo mensual aproximado de \$260. Adicionalmente, se debe calcular la depreciación del equipo utilizado durante la ejecución de este proyecto. En la tabla 6.1 se presentan los valores utilizados para el costo de depreciación del recurso computacional.

Tabla 6.1 Valores utilizados para el cálculo de depreciación

Valor de compra	Valor residual	Vida útil
\$2,000	\$500	5 años

De esta tabla se puede proceder a estimar la depreciación. La depreciación anual de esta computadora es de aproximadamente \$300. Durante el plazo del proyecto de graduación, aproximado a 4 meses, se calcula una depreciación para el recurso computacional de aproximadamente \$100.

Otro recurso significativo fue el recurso del tiempo. Para la elaboración de este proyecto se trabajó aproximadamente 15 horas semanales por las 16 semanas estipuladas para este. Las tareas durante este tiempo dependieron de la fase del proyecto donde se estaba, ya fuera investigación, diseño o construcción. Semanalmente se realizaba un reporte al supervisor del CIMAR, lo cual tardaba aproximadamente media hora. Luego, se dedicaban cerca de 11 horas a

la semana para desarrollar aspectos directos del proyecto, como la investigación, diseño y construcción. El tiempo restante, aproximadamente 2.5 horas, se dedicaba a realizar la documentación necesaria del proyecto. Se resume que, de las 240 horas dedicadas a este proyecto, 176 se alocaron al desarrollo de este, 8 horas se dedicaron a reportes al CIMAR y 56 horas se dedicaron a la documentación de este. En la tabla 6.2 se presenta el costo aproximado del estudiante.

Tabla 6.2 Costo aproximado de estudiante

Costo mensual	Duración	Total
\$490	4 meses	\$1,960

También fue necesario acudir al recurso humano, para obtener guía y otros puntos de vista. Este recurso consistió en el profesor y asesor Juan Carlos Brenes, que brindó asesoría con temas técnicos y formales del proyecto. Además, fue necesario consultar a investigadores en el CIMAR, como Sergio Madrigal e Isaac Chaves. Este recurso fue crucial para la determinación de necesidades y la investigación de los procesos relacionados a los sistemas BRUVS. Por último se tiene a Mario Espinoza, el supervisor del proyecto.

Respecto al a oferta y demanda de este prototipo, actualmente solo se cuenta con un cliente, dado que se desarrolló considerando exclusivamente las necesidades del CIMAR. La oferta también se considera única ya que no existe ningún producto similar en el mercado.

Un costo directo asociado al desarrollo del proyecto consiste en los componentes necesarios para la construcción del prototipo. Se realiza una lista de componentes donde se describe el lugar donde se obtuvieron, la cantidad y el costo aproximado de los mismos. Esto se presenta en la tabla 6.1. Dado que esta es una revisión inicial del desarrollo del prototipo, no se considera relevante realizar un análisis del costo profundo, ya que todavía se puede optimizar el diseño para disminuir el capital y el tiempo necesarios para adquirir uno de estos dispositivos. Durante el proceso de compra se obtuvo el doble de cada cantidad necesaria, para de esta forma tener un componente de respaldo en caso de algún inconveniente. Esto genera un costo estimado

de \$386.84 necesario para el desarrollo del prototipo. El costo estimado para los componentes de un único prototipo se presenta en la tabla 6.3.

Una forma de optimizar el prototipo sería diseñando y fabricando una placa impresa, o PCB, donde se pueden integrar todos los componentes y dispositivos periféricos. De esta forma se reduciría el tiempo de construcción del dispositivo ya que estos dispositivos vendrán integrados en una única placa con las conexiones necesarias ya realizadas. Estas mejoras pueden llegar a aumentar la escalabilidad de este dispositivo, ya que se podrían reducir los pasos para el proceso de ensamblaje de este. Dado a que ya el código está diseñado, se puede generar una imagen de disco personalizada para copiar a varias tarjetas SD. Así solamente se ensambla el dispositivo y se coloca la tarjeta SD, sin ser necesario inicializar cada Raspberry Pi para cada dispositivo.

Por último, se procede a calcular el costo total del desarrollo de este proyecto durante el plazo de 16 semanas. Para esto, se debe sumar el costo mensual de las licencias utilizadas, la depreciación del equipo, el sueldo del estudiante, y el costo de los materiales implementados para la elaboración del prototipo. Se debe tomar en cuenta que se compraron componentes para realizar dos prototipos completos. Todos estos cálculos, y el costo final de desarrollo se presentan en la tabla 6.4. Realizando la suma de costos, se llega a un costo total de desarrollo de aproximadamente \$3487.

Tabla 6.3 Lista y costo de componentes utilizados en prototipo

Componente	Vendedor	Precio	Cantidad
Electrónica			
Raspberry Pi 4	CRCibernetica	\$58.95	1
SD card 64GB	Amazon	\$12.49	1
Camara RPi V1.3	CRCibernetica	\$19.95	1
MS5837-30BA	Digikey	\$8.46	1
Módulos LED	Adafruit	\$4.95	0.4
DS3231 RTC	CRCibernetica	\$5.95	1
ADS 1115	CRCibernetica	\$5.95	1
Proto Hat Pi	Adafruit	\$4.95	1
18650 2500mAh 3.7V	CRCibernetica	\$9.95	2
18650 Holder	CRCibernetica	\$1.95	1
5V buck converter	CRCibernetica	\$1.95	1
Aux Switch	CRCibernetica	\$3.95	1
Cables silicon 24awg	CRCibernetica	\$1.55	4
Pines 2.54mm	CRCibernetica	\$1.95	0.5
Carcasa			
Tapa Acrilico	Ferretería	\$4.09	1
Tomillos 6x1/2"	Ferretería	\$0.65	1
Union PVC pared gruesa 3"	Ferretería	\$7.36	1
Reducción PVC 3" a 2"	Ferretería	\$6.87	1
Adaptador Limpieza 3"	Ferretería	\$8.18	1
Tapon Limpieza 3"	Ferretería	\$4.26	1
O-Ring	SuperEmpaques	\$4.09	1
Adhesivo PVC Lanco WetDry	Ferretería	\$5.73	0.1
Adhesivo Epoxy	Ferretería	\$16.37	0.2
Teflon	Ferretería	\$0.65	1

Estimado total: \$193.42

Tabla 6.4 Costo total de desarrollo del proyecto

	Costo	Cantidad	Subtotal
Licencia Autodesk	\$260	4	\$1,040
Depreciación equipo	\$100	1	\$100
Mensualidad estudiante	\$490	4	\$1,960
Componentes de prototipo	\$193.42	2	\$387
	Costo total:		\$3,487

Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

Este proyecto fue exitoso en el diseño de un módulo de grabación para un sistema *BRUVS* personalizado a las necesidades del CIMAR. Por medio del diagnóstico de necesidades se logró determinar las características necesarias para diseñar y construir un prototipo. Este es capaz de operar a un máximo de 10 metros de profundidad, cumpliendo además las necesidades de sensores adicionales e integración de video de alta definición.

El sistema electrónico es capaz de tomar datos y grabar simultáneamente en alta definición, ya sea en 720p o 1080p. Utilizando los componentes periféricos se logra generar un archivo CSV que contiene estampa de tiempo, presión y temperatura externa, y datos adicionales del sistema electrónico. Todo esto se logra con una tasa de aprobación del 100% en todas las pruebas realizadas.

El diseño del sistema mecánico, la carcasa, es capaz de ser hermético a profundidades de hasta 10 metros. En las pruebas realizadas a 3 metros y a 10 metros se obtuvo una tasa de aprobación del 100%. Este diseño permite la expansión del sistema electrónico, ya que se pueden integrar sensores adicionales con mínima modificación.

La combinación de estos sistemas crea un módulo de grabación *BRUVS* capaz de operar a profundidades de hasta 10 metros. Se generan datos de la profundidad y temperatura externa mientras se captura video y se ajusta la iluminación de ser necesario.

7.2 Recomendaciones

A continuación, se presentan recomendaciones para el mejoramiento del proyecto en caso de ser continuado:

1. Agregar un circuito de *soft power*. Un circuito de *soft power* permite controlar la alimentación al dispositivo por medio de software. De esta forma, se puede eliminar la necesidad de un segundo interruptor para activar la alimentación y simplificar la interfaz y las conexiones del sistema electrónico.
2. Diseñar e incorporar todo en una PCB. La incorporación de todos los dispositivos electrónicos en una placa impresa diseñada a la medida de este proyecto permitiría reducir el tiempo de ensamblaje y la complejidad del dispositivo.
3. Agregar un lente para la cámara. El sensor de imagen que se utiliza actualmente carece de un lente. Al agregar un lente que permita aumentar el campo de visión de la cámara se podría llegar a capturar una mayor área en la imagen.
4. Realizar una revisión del diseño de sellado. A pesar de ser exitoso en su objetivo de sellar la carcasa, el diseño de sellado actual es la limitante de profundidad.
5. Incorporar un sensor de humedad para realizar estudios de humedad relativa. De esta forma se podría detectar si existe una fuga en la carcasa.
6. Optimizar el sistema operativo del Raspberry Pi con el propósito de obtener un mayor control de los procesos que realiza. De esta forma se podrían obtener resultados de consumo energético más constantes.

Referencias bibliográficas

- [1] J. A. Vargas, “Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología,” Universidad de Costa Rica. 12 noviembre de 2018. [Online], Disponible: <http://www.cimar.ucr.ac.cr/index.php/cimar-info>
- [2] M. Espinoza, T. Araya-Arce, I. Chaves-Zamora, I. Chinchilla, M. Cambra, “Monitoring elasmobranch assemblages in a data-poor country from the Eastern Tropical Pacific using baited remote underwater video stations,” Scientific Reports. 14 octubre de 2020. [Online], Disponible: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-74282-8>
- [3] M. H. Eisele, S. Madrigal-Mora, M. Espinoza, “Drivers of reef fish assemblages in an upwelling region from the Eastern Tropical Pacific Ocean,” Wiley Online Library. 4 diciembre de 2020. [Online], Disponible: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jfb.14639>
- [4] S. Madrigal, “Vida Secreta de los Tiburones de la Isla del Coco,” 1 de diciembre de 2020. [Online], Disponible: https://www.youtube.com/watch?v=JRu6BT-M2H4&feature=youtu.be&ab_channel=SergioMadrigalMora
- [5] K. T. Ulrich y S. D. Eppinger, "Diseño y Desarrollo de Productos," Tercera ed., Mexico: McGraw-Hill, 2004.
- [6] ONSET Computer Corporation, HOBO Water Temperatura Data Logger, 2021. Disponible: <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u22-001>
- [7] Raspberry Pi Foundation, Raspberry Pi Documentation, 2021. Disponible: <https://www.raspberrypi.org/documentation/>
- [8] Raspberry Pi Foundation, Camera Serial Interface – 2, 2021. Disponible: <https://www.raspberrypi.org/documentation/linux/software/libcamera/csi-2-usage.md>
- [9] Avnet Inc., MEMS Pressure Sensors, 2021. Disponible: <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/mems/>
- [10] International Electrotechnical Commission, IP Ratings, 2020. Disponible: <https://www.iec.ch/ip-ratings>
- [11] R Coombes, IP Ratings. GWP Group, 19 de abril, 2021. Disponible: <https://www.gwp.co.uk/guides/ip-ratings-explained/>

- [12] Source IEx, IP Degrees Testing. 2021. Disponible:
<https://www.sourceiex.com/Catalogs/IP%20Degress%20Testing%20Details.pdf>
- [13] JD, Differences between Acrylic and Polycarbonate, 5 de agosto, 2018. Disponible:
<https://www.theplasticpeople.co.uk/blog/the-differences-between-acrylic-and-polycarbonate/#:~:text=Polycarbonate%20is%20stronger%20than%20acrylic.&text=Polycarbonate%20has%20250%20times%20the,easily%20than%20polycarbonate%20under%20stress.>
- [14] Curbell Plastics, Acrylic vs. Polycarbonate, 2020. Disponible:
<https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Plastic-Properties/Acrylic-vs-Polycarbonate>
- [15] Durman, Resistencia y Durabilidad Accesorios de PVC SCH80, noviembre 2016.
Disponible:
<https://www.durman.com/descargas/accesoriospotables/brochure/BrochureSCH80.pdf>
- [16] Lanco, Wet-Dry PVC Cement Technical Data Sheet, junio 2020. Disponible:
<https://www.lancopaints.com/america-central/wp-content/uploads/sites/2/2017/08/Wet-Dry-SM248-TP248-TDS-ENG-1.pdf>
- [17] Loctite, Loctite Epoxy Marine Safety Data Sheet, 25 agosto, 2020. Disponible:
https://www.loctiteproducts.com/en/products/build/epoxies/loctite_epoxy_marine.html
- [18] Super Empaques, Fichas Técnicas Anillos, 2021. Disponible:
<http://www.superempaques.com/wp-content/uploads/2020/04/Anillos-Quad-Rongs-and-Flange-Seals-pulgadas.pdf>
- [19] Coating Systems Inc, Quad Seals vs O-Ring Seals, 30 mayo 2018. Disponible:
<https://coatingsystems.com/quad-seals-vs-o-ring-seals/>
- [20] Engineering Fundamentals, Design Guidelines for O-Ring Seals, 2021. Disponible:
https://www.efunda.com/designstandards/oring/design_guidelines.cfm
- [21] BlueRobotics, M10 Cable Penetrator, 2021. Disponible:
<https://bluerobotics.com/store/cables-connectors/penetrators/penetrator-10-25-a/>
- [22] TE Connectivity, MS5837-30BA Datasheet, diciembre 2019. Disponible:
<https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchrtv&DocNm=MS5837-30BA&DocType=DS&DocLang=English>
- [23] BlueRobotics, MS5837-Python Library, 2021. Disponible:
<https://github.com/bluerobotics/ms5837-python>

- [24] Maxim Integrated, DS3231 Datasheet, marzo 2015. Disponible:
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231-DS3231S.pdf>
- [25]<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1113-q1.pdf?HQS=dis-dk-null-digikeymode-dsf-pf-null-ww&ts=1621631263118>
- [26] Raspberry Pi Foundation, Power Supply, 2021. Disponible:
<https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/power/README.md>
- [27] Texas Instruments, ADS111X-Q1 Datasheet, enero 2018. Disponible:
https://www.ti.com/lit/an/slvae14/slvae14.pdf?ts=1620041685156&ref_url=http%253A%252F%252Fwww.baidu.com
- [28] K Stevenson, High Temperature PLA Printer Filament, 15 de junio 2018. Disponible:
<https://www.fabbaloo.com/blog/2018/6/15/high-temperature-pla-3d-printer-filament#:~:text=This%20is%20known%20as%20the,frequently%20encountered%20real%20life%20situations.>

Apéndices

Apéndice A. Transcripciones de entrevistas

Transcripción de entrevista con investigador Sergio Madrigal

Contexto

El método original para conocer de peces es utilizando censos de buceo. Se cuentan los peces que ve cuando se bucea. Se tienen varias limitaciones.

Principalmente que un buzo es algo ajeno al ambiente, hace ruido y llama la atención, asusta a los animales y hace que se escondan y por ende no se pueden ver. Esto es de especial atención con los tiburones que son de alto interés para investigadores.

Adicionalmente, con los buceos se limita el tiempo ya que solo se cuenta con un tiempo máximo de 3 horas al día. Esto dificulta observar las especies que sean poco abundantes y limita el alcance de las inmersiones. Incluso en lugares como la Isla del Coco con altas cantidades de especies de tiburones se puede dificultar un muestreo efectivo.

¿Cuáles son las ventajas de los sistemas BRUVS?

Si se utiliza una cámara y se le agrega carnada, se colocan varias al mismo tiempo y se ponen a grabar, se pueden obtener más de 10 horas de información con solo 5 cámaras en un solo día. Además, al tener carnada atrae muchas especies que no se verían en el método convencional de muestreo. Este sistema aumenta el esfuerzo de muestreo que se tiene y la información recopilada en un mismo día.

De estos videos se puede conseguir información como:

- Abundancia
- Número de especies
- Niveles de cadena alimenticia
- Efectos de áreas protegidas en la estructura de la cadena alimenticia
- Cambios a través del tiempo

Para toda la comunidad de peces, desde peces pequeños a tiburones

¿Cuál sería la ventaja de superar los 50m de profundidad?

La gran mayoría de conocimiento que hay es por encima de los 30m. Es el límite de buceo seguro y casi todos los buceos se hacen por encima de esta profundidad. El equipo actual no sobrepasa los 35 metros. Esto limita el conocimiento de especies que existen más allá de esta profundidad. Tener un sistema de cámaras que supere estas profundidades abre las puertas para

realizar nuevos estudios y conocer mucho más del mar. Actualmente se maneja un porcentaje muy limitado.

Transcripción de entrevista con investigador Isaac Chaves

¿Cuál es el proceso actual de inmersión de los BRUVS?

- Las estructuras deben armarse previo a las inmersiones, preferiblemente en tierra, donde se colocan los sensores de variables ambientales (nosotros utilizamos sólo de temperatura/luminosidad, o sólo de temperatura).

Las estructuras que utilizamos cuentan con dos partes que se acoplan y deben atornillarse para mantenerse estables. Una tercera parte, el brazo o tubo que lleva el contenedor con carnada (que es utilizada como atrayente para especies depredadoras) se acopla en el campo antes de lanzar la estructura debido a que se llena con carnada fresca antes de cada inmersión. Previo a la inmersión también se coloca la cámara (GoPro) y se anotan los datos asociados a ese lance (Nombre del sitio, profundidad, coordenadas, fecha, hora y código de la estructura/cámara).

¿Qué resolución de video utilizan? ¿La considera aceptable, mala o innecesariamente buena?

- Grabamos a 1080p con 30fps, lo cual resulta una resolución bastante óptima para realizar el análisis de los videos. Lo ideal, pensando en el análisis, donde a veces se necesita ralentizar o acelerar el video sin que el video pase a reproducir cuadros, sería grabar a 60fps, pero en este caso los videos resultan demasiado pesados y limitan el espacio de almacenamiento.

¿Qué información adicional se toma actualmente?

- Notas acerca de características del sitio, si el monitoreo de un sitio en particular es de interés; profundidad, coordenadas y horas de entrada y salida. La estructura lleva atada un sensor de temperatura.

¿Cuáles variables ambientales consideraría beneficiosas tomar?

- Entre más variables se puedan registrar es mejor porque se pueden encontrar patrones interesantes en los datos que se toman, sin embargo es algo que depende de la pregunta del investigador. En nuestro caso, que nos interesa estudiar comunidades de peces, tiburones, y arrecifes, pienso que profundidad, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, clorofila y velocidad de corriente serían suficientes para tener información de excelente calidad.
- La profundidad se toma desde el bote con una ecosonda, pero no es un dato exacto, si se pudiera medir desde la estructura sería ideal.

¿Considera que hay ventajas en un sistema BRUVS capaz de superar los 50m de profundidad?
¿Cuáles?

- Definitivamente. Se podrían explorar sitios en profundidades a las cuales no se puede acceder por medio de buceo SCUBA (>40m). De estos ambientes se sabe muy poco.
- Sí sería necesario tener en consideración el tema de la luz y visibilidad, ya que a estas profundidades esto usualmente es un inconveniente. Conforme se avanza en profundidad, se van perdiendo longitudes de onda de los rayos solares y los colores cambian, además de que la luz en ambientes turbios suele penetrar muy poco, por lo cual un buen sistema de iluminación sería necesario.

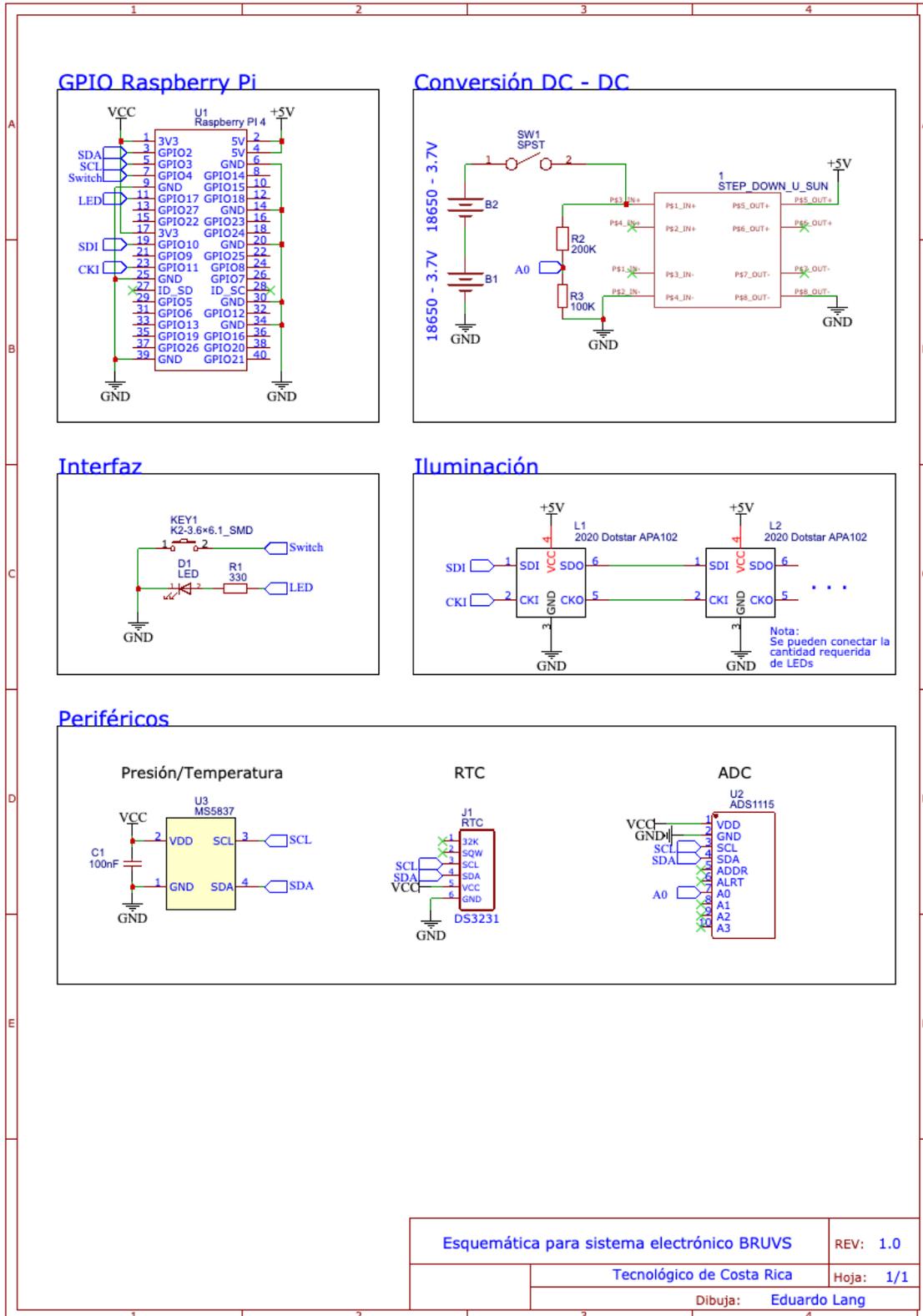
Del 1(poco importante) al 5(muy importante), ¿cuánta importancia le daría a la simplicidad de uso de un nuevo sistema?

- Un 5. En muchos guardaparques y guías locales colaboran y son partícipes de investigaciones de las universidades. Entre más simple sea el sistema, más gente se podría capacitar para su uso y de esta forma involucrar a las comunidades y guardaparques en proyectos de investigación.

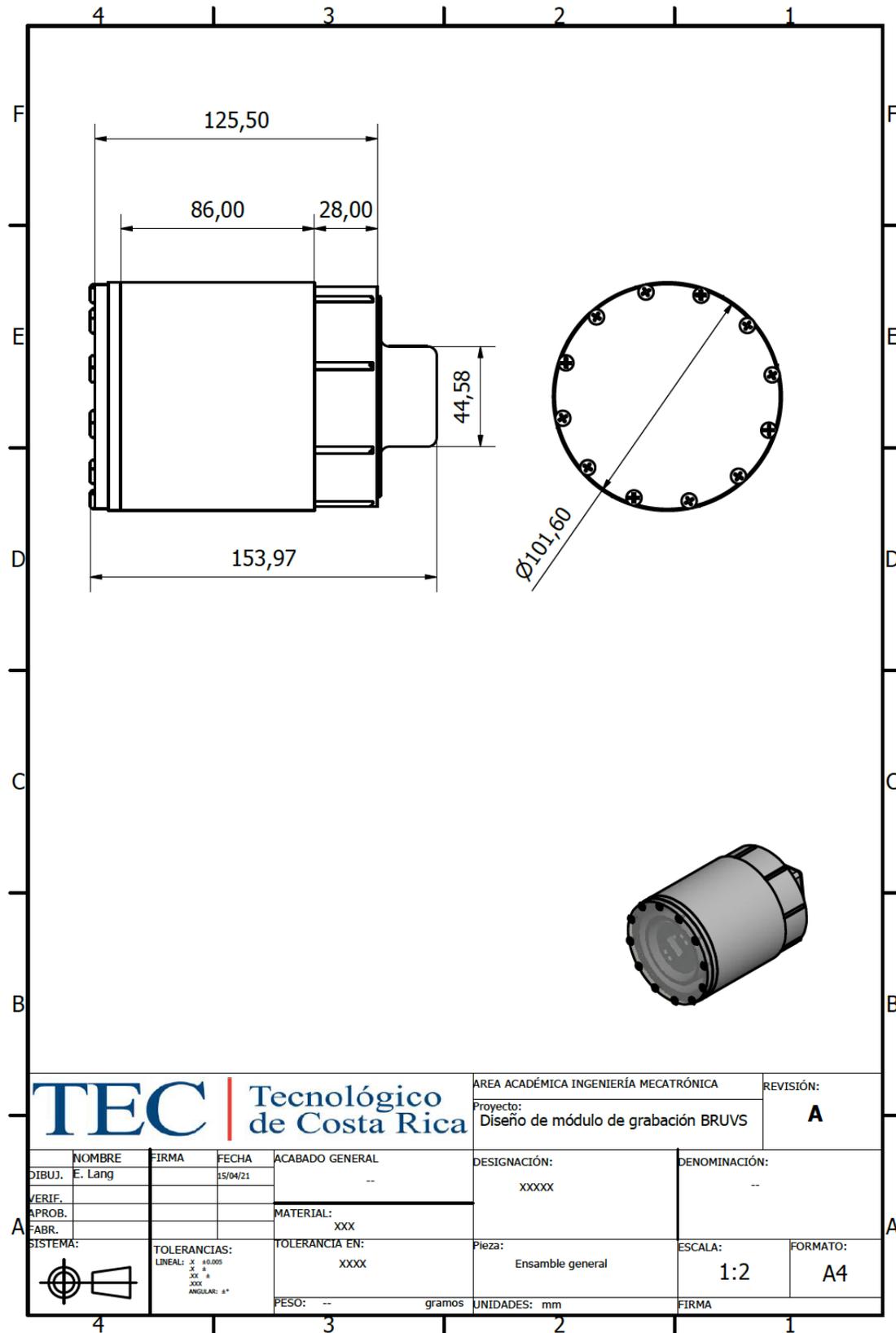
¿Tiene algunas recomendaciones de ideas o funcionalidades adicionales?

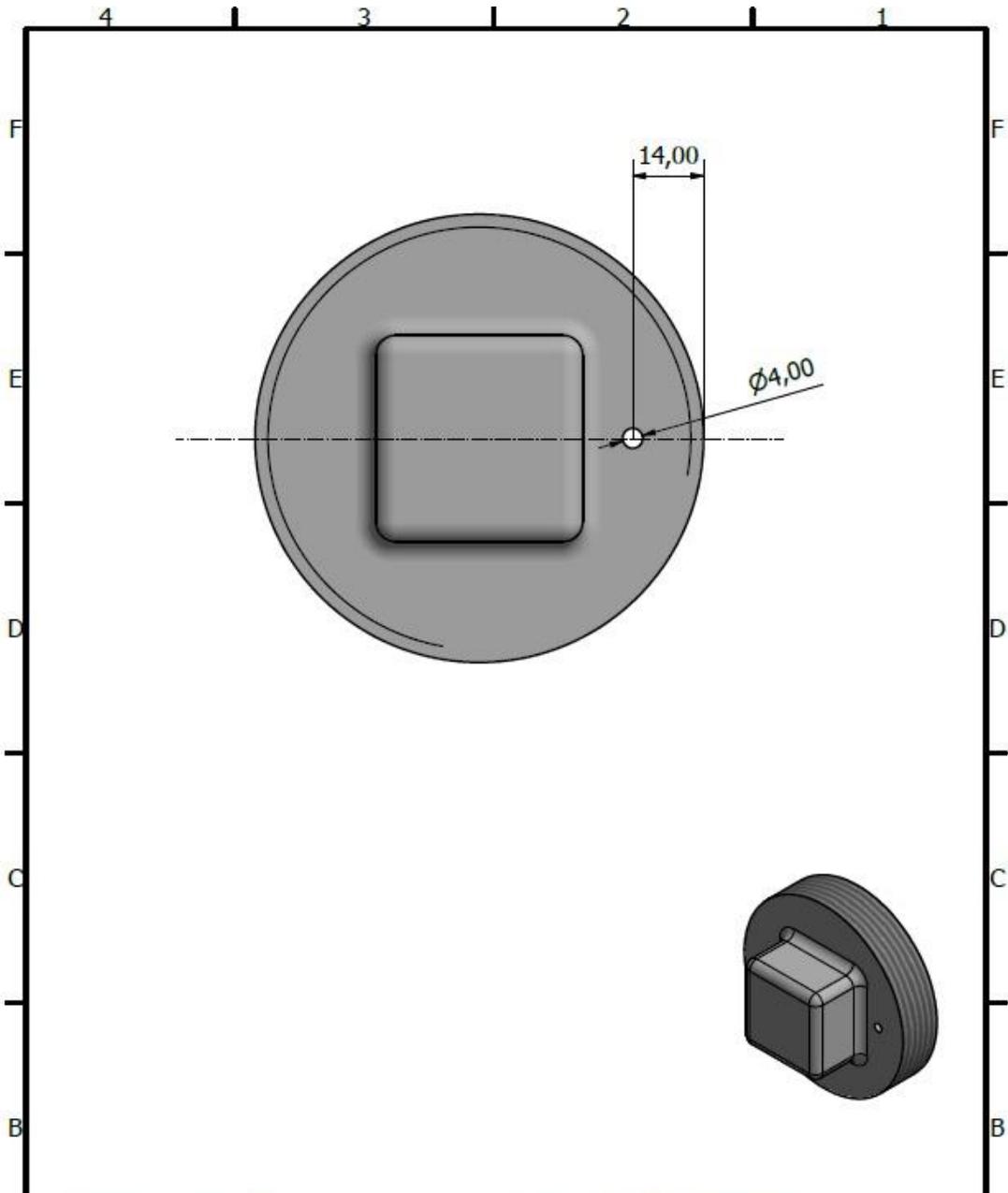
- Sería ideal optimizar el diseño de la estructura de fondo para disminuir su tamaño sin la necesidad de disminuir su peso, porque igual necesita estar en el fondo de manera estable. Con el diseño actual, resulta incómoda para llevar varias en los botes y con una estructura de menor tamaño se podrían llevar más sin la necesidad de armarlas antes.
- Otra desventaja de las estructuras que utilizamos es que resulta incómodo acoplarle un foco o linterna que ilumine la zona del campo de visión de la cámara. Un sistema de iluminación incorporado o alguna forma de facilitar el acople de uno podría incrementar la aplicabilidad de los BRUVS. De esta forma se podría estudiar ambientes más profundos, o realizar muestreos nocturnos.

Apéndice B. Esquemática de conexión

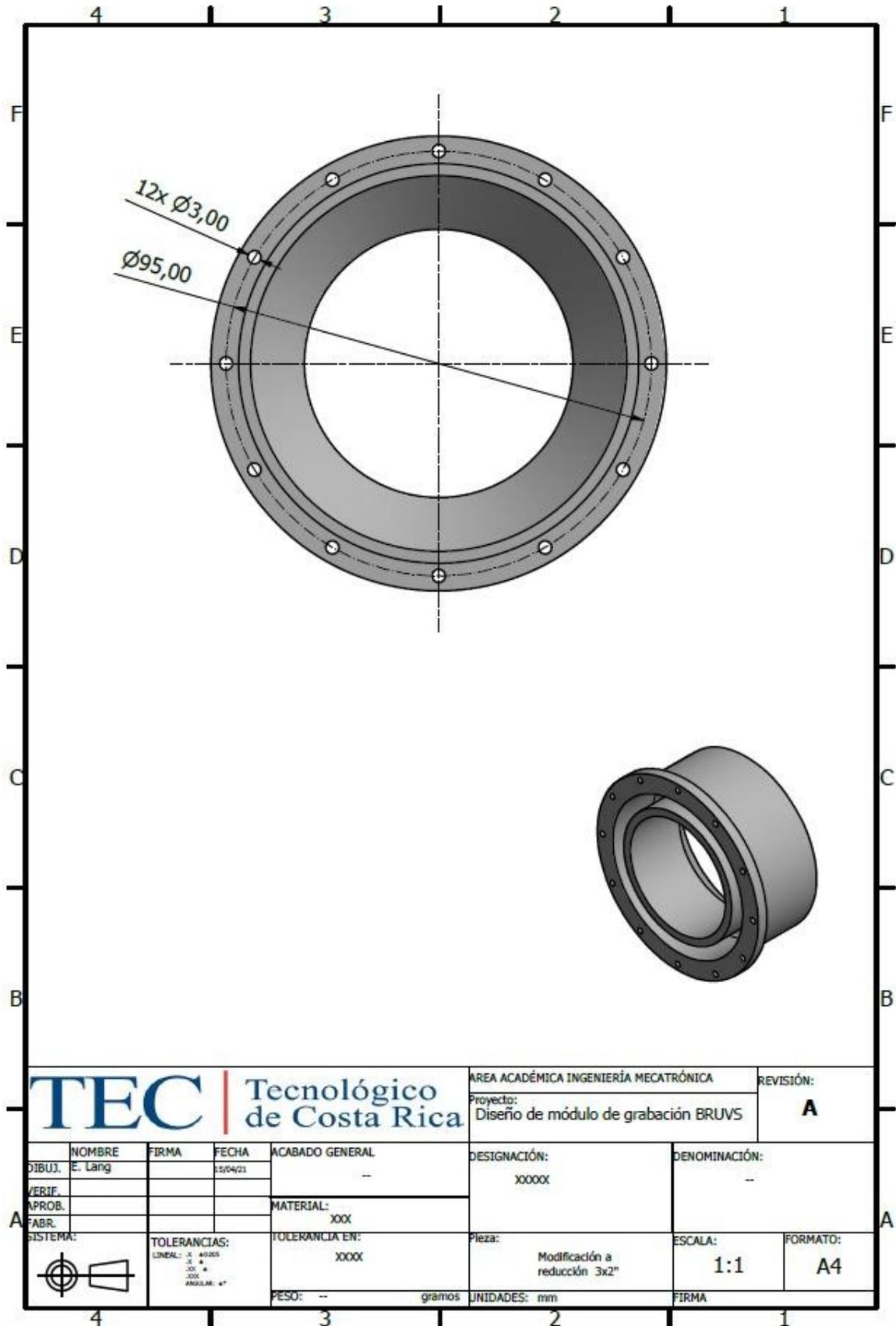


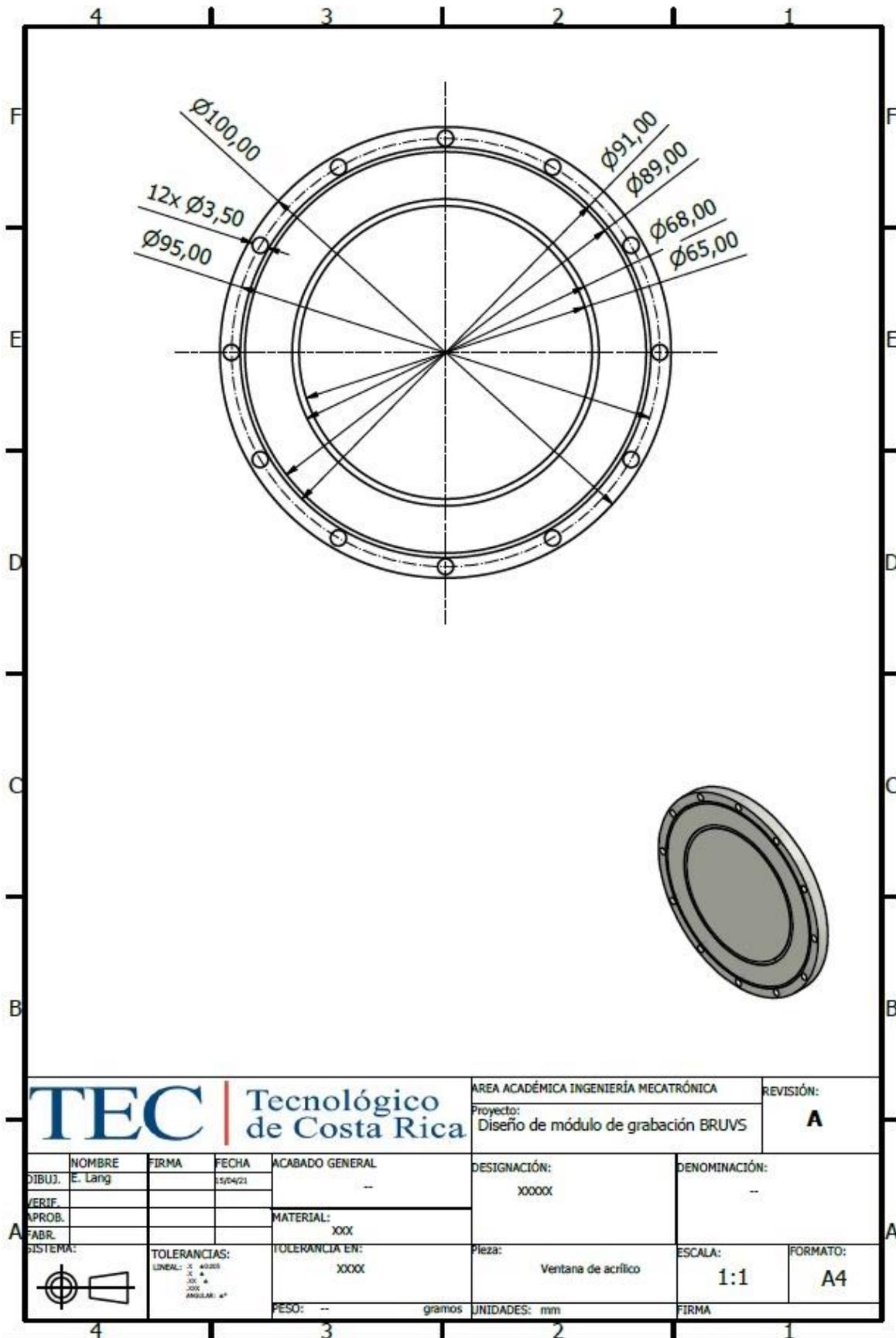
Apéndice C. Planos de piezas no estándar



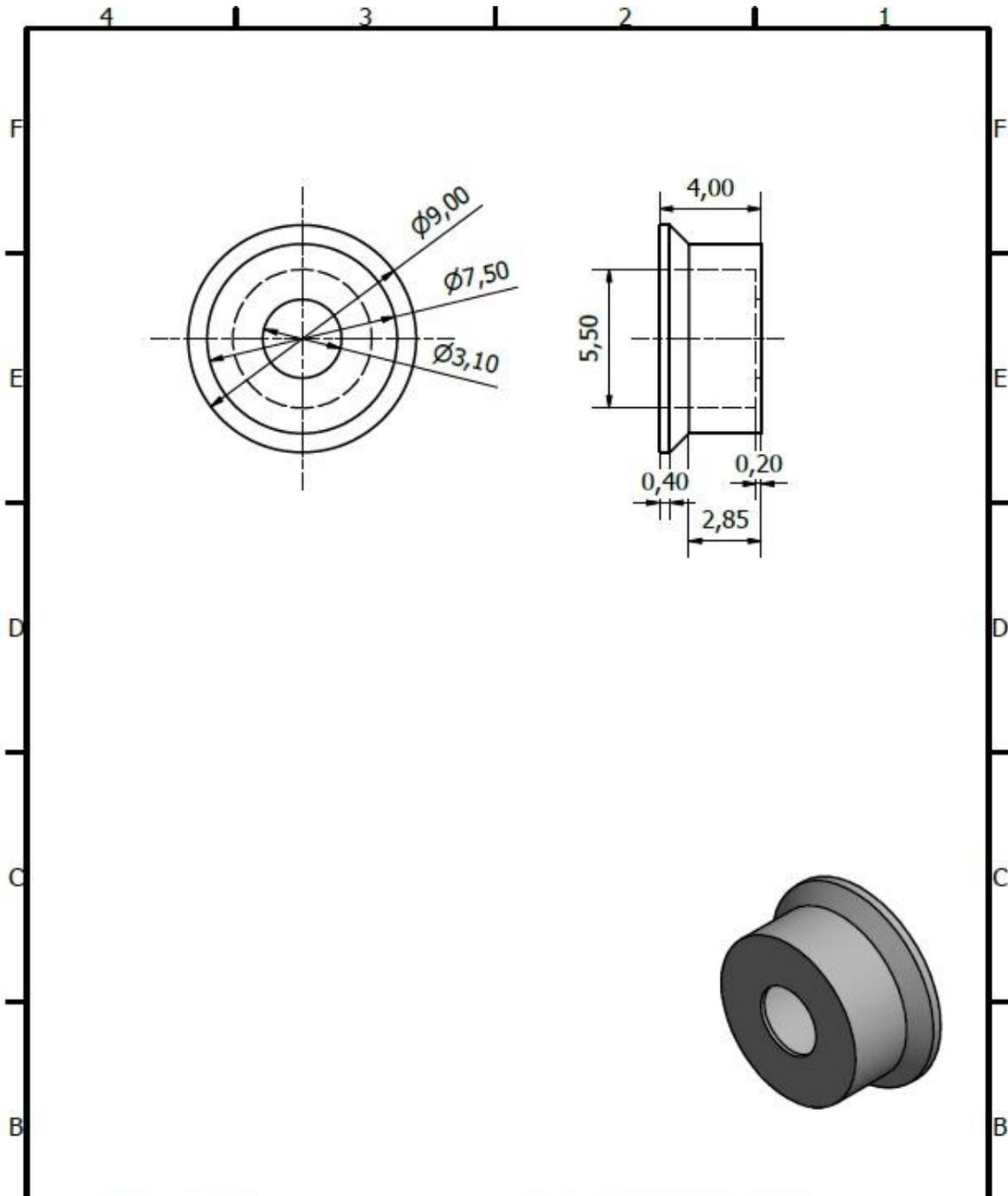


TEC Tecnológico de Costa Rica		AREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:	
		Proyecto: Diseño de módulo de grabación BRUVS		A	
NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL	DESIGNACIÓN:	DENOMINACIÓN:
DIBUJ. E. Lang		15/04/21	--	XXXXX	--
VERIF.					
PROB.			MATERIAL:		
FABR.			XXX		
SISTEMA:	TOLERANCIAS:	TOLERANCIA EN:	Pieza:	ESCALA:	FORMATO:
	LINEAL: ± 0,05 X ± XX ± XXX ± ANGULAR: ±°	XXXX	Modificación a tapón 3"	1:1	A4
	PESO: --	gramos	UNIDADES: mm	FIRMA	

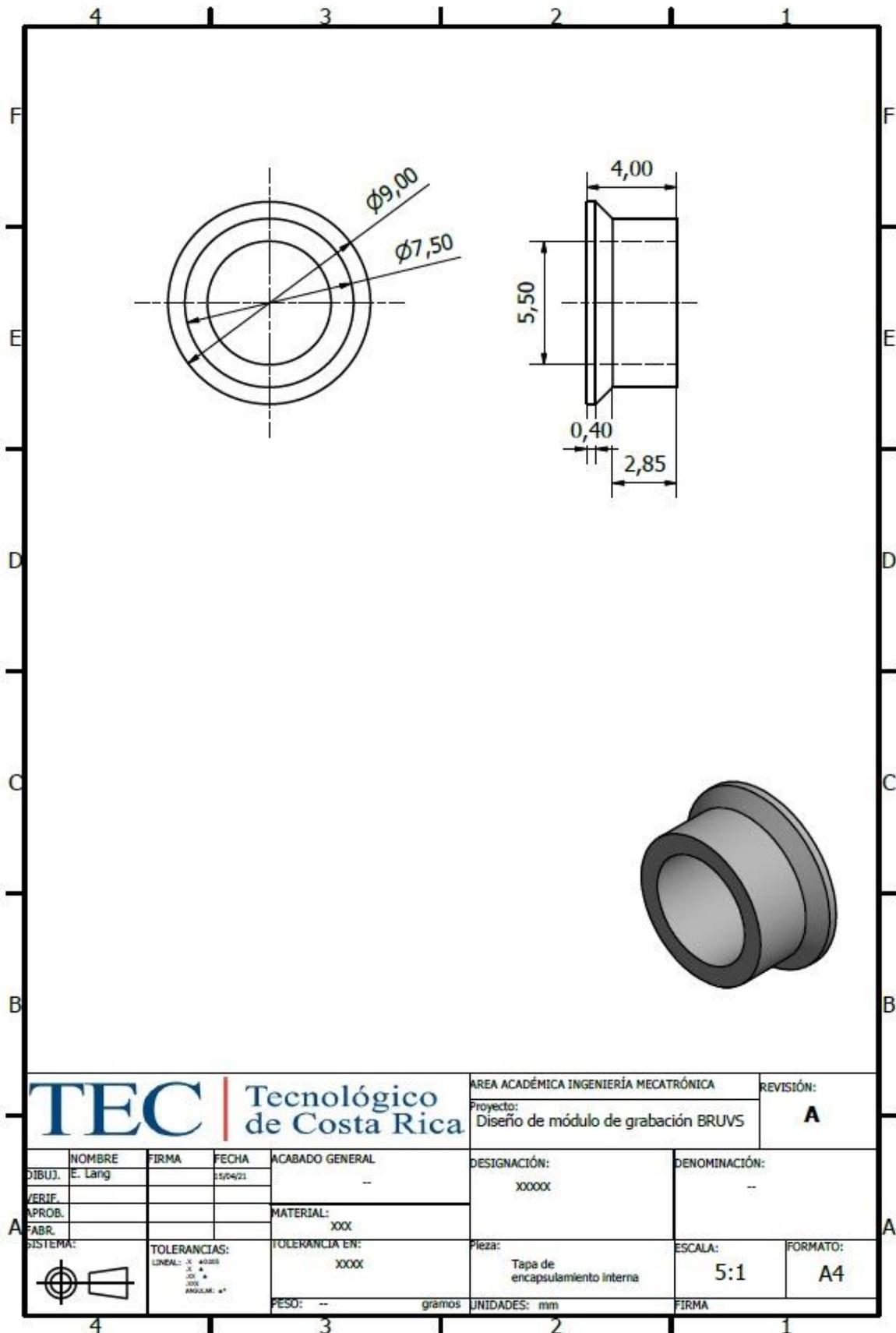


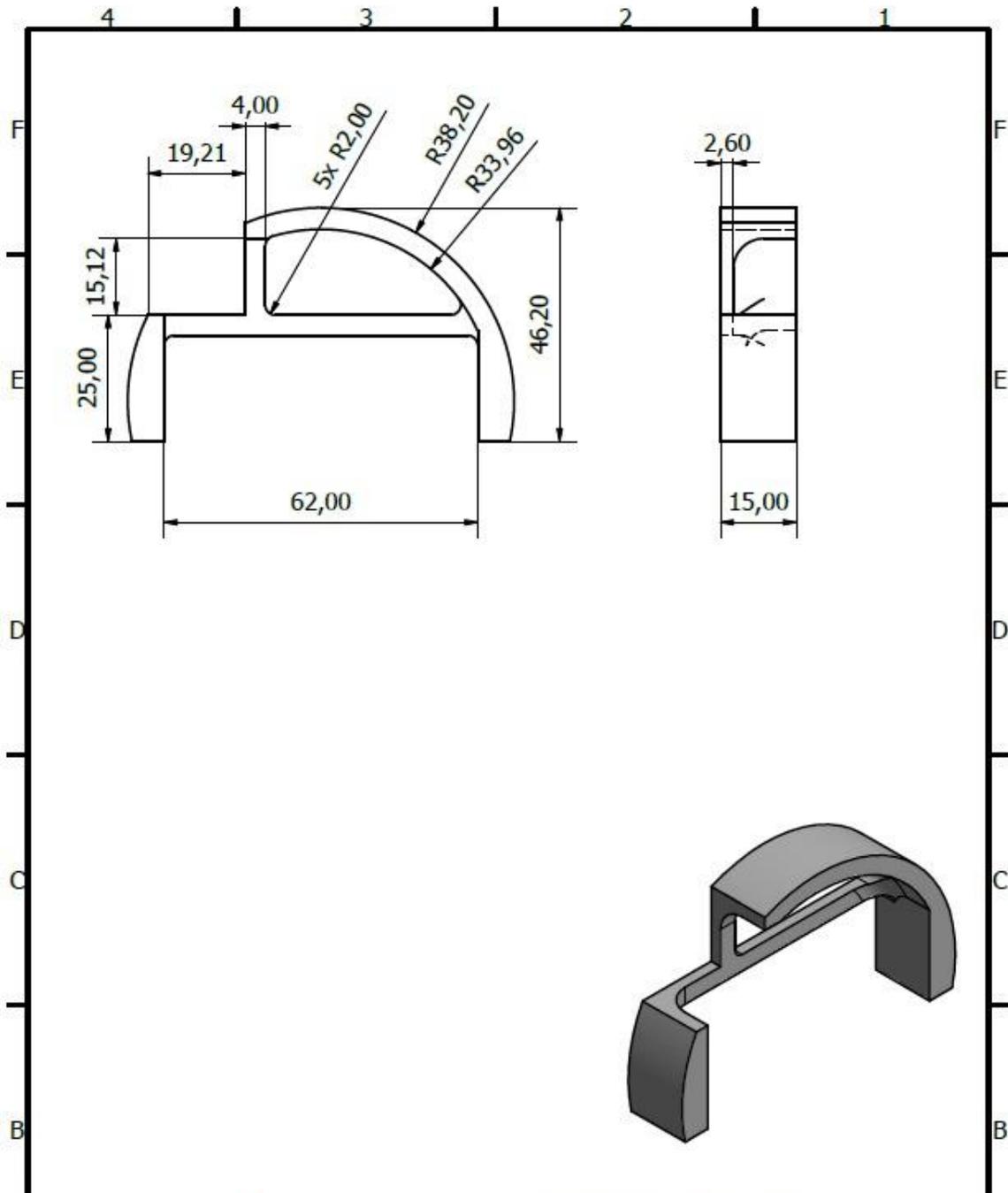


TEC Tecnológico de Costa Rica		AREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:
		Proyecto: Diseño de módulo de grabación BRUVS		A
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL
VERIF.	E. Lang		15/04/21	--
APROB.				MATERIAL:
FABR.				XXX
SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	Pieza:
	LINEAL: X 40:00 X X X ANGULAR: 4°		XXX	Ventana de acrílico
	PESO: --	gramos	UNIDADES: mm	ESCALA:
				1:1
				FORMATO:
				A4
				FIRMA

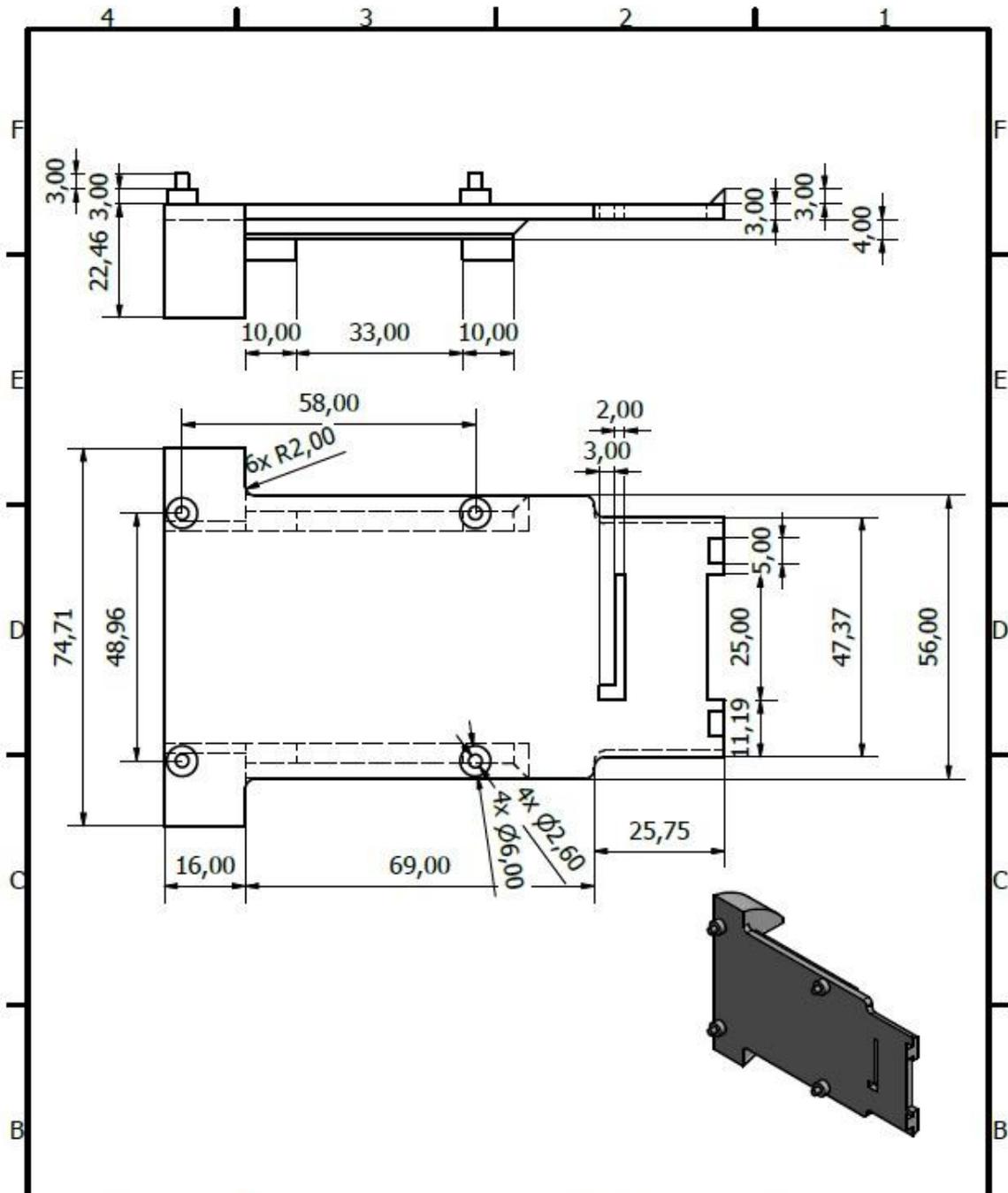


TEC Tecnológico de Costa Rica				AREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:	
				Proyecto: Diseño de módulo de grabación BRUVS		A	
DIBUJ. E. Lang		FIRMA		FECHA 25/04/21		ACABADO GENERAL --	
VERIF.						DESIGNACIÓN: XXXX	
APROB.						DENOMINACIÓN: --	
FABR.				MATERIAL: XXX			
SISTEMA:		TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:		Pieza: Tapa de encapsamiento externa	
		LINEAL: X 0,050 X 0,100 X 0,200 ANGULAR: 0,5°		XXX		ESCALA: 5:1	
		PESO: --		gramos		UNIDADES: mm	
						FORMATO: A4	
						FIRMA	

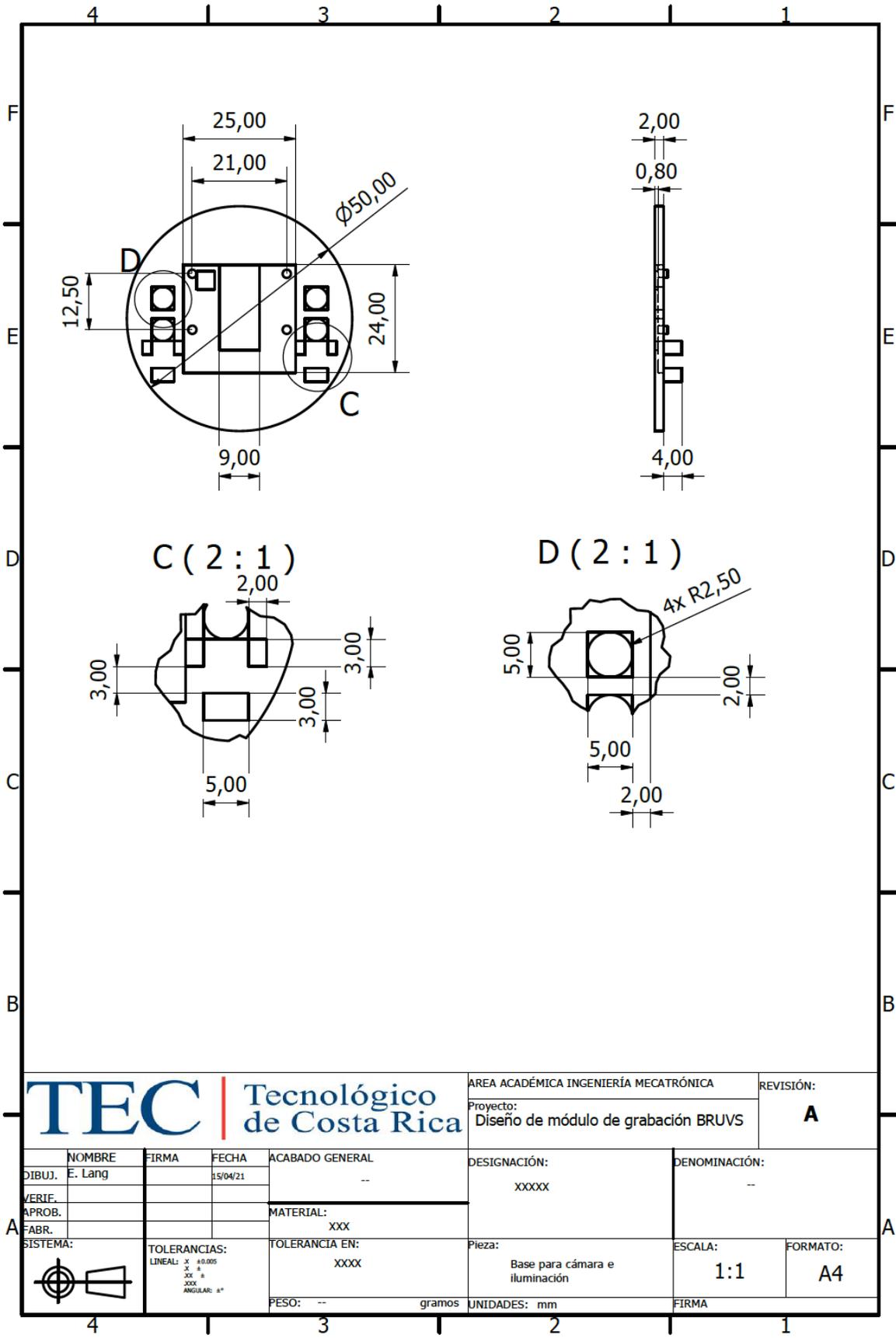




		Tecnológico de Costa Rica		AREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:	
				Proyecto: Diseño de módulo de grabación BRUVS		A	
DIBUJ. E. Lang	FIRMA	FECHA 25/04/21	ACABADO GENERAL --		DESIGNACIÓN: XXXX	DENOMINACIÓN: --	
VERIF.	FIRMA	FECHA	MATERIAL: XXX		Pieza: Soporte interno para tapón 3"		
APROB.	FIRMA	FECHA	TOLERANCIA EN: XXXX		ESCALA: 1:1	FORMATO: A4	
SISTEMA:	TOLERANCIAS: LINEAL: ± 0,025 ° ± 0,5 ° ± 0,1 ANGULAR: 4°		PESO: -- gramos		UNIDADES: mm	FIRMA	



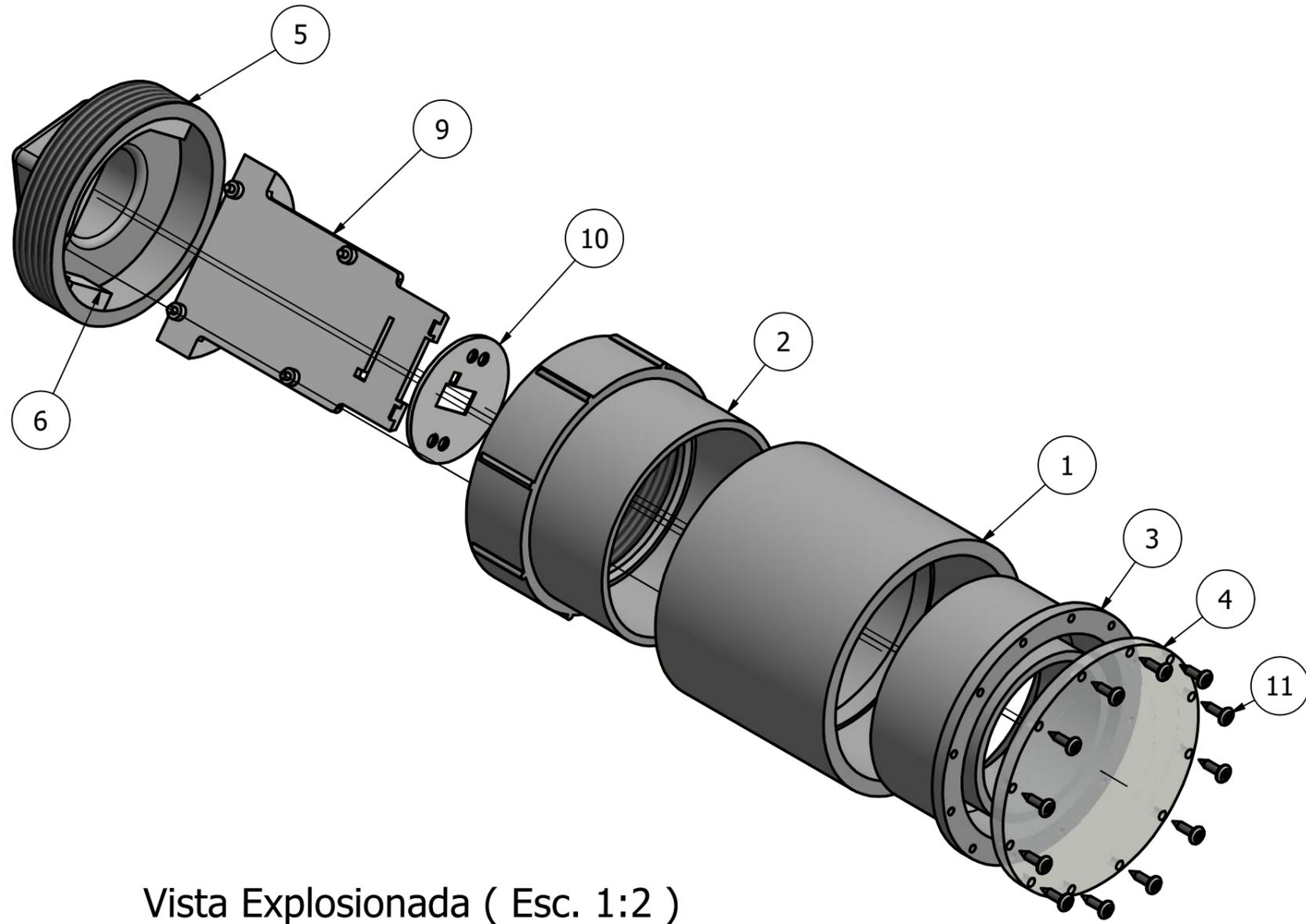
 Tecnológico de Costa Rica				AREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:
				Proyecto: Diseño de módulo de grabación BRUVS		A
DIBUJ.	NOMBRE E. Lang	FIRMA	FECHA 25/04/21	ACABADO GENERAL -	DESIGNACIÓN: XXXXX	DENOMINACIÓN: -
VERIF.	APROB.	FABR.	SISTEMA:	MATERIAL: XXX	Pieza: Base para sistema electrónico	ESCALA: 1:1
	TOLERANCIAS: LINEAL: ± 0.050 ANGULAR: ± 4°		TOLERANCIA EN: XXXX	PESO: - gramos	UNIDADES: mm	FORMATO: A4
				FIRMA		



TEC Tecnológico de Costa Rica				AREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:	
				Proyecto: Diseño de módulo de grabación BRUVS		A	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		ACABADO GENERAL	
DIBUJ. E. Lang				15/04/21		--	
VERIF.						DESIGNACIÓN:	
APROB.						XXXXX	
FABR.						DENOMINACIÓN:	
SISTEMA:		TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:		Pieza:	
		LINEAL: $\pm 0,005$ XX XXX ANGULAR: 8°		XXXX		Base para cámara e iluminación	
PESO: --		gramos		UNIDADES: mm		ESCALA: 1:1	
						FORMATO: A4	
						FIRMA	

8 7 6 5 4 3 2 1

F
E
D
C
B
A



Vista Explosionada (Esc. 1:2)

Lista de Componentes		
Item	Cantidad	Parte
1	1	Union PVC 3"
2	1	Adaptador Limpieza 3"
3	1	Reduccion 3x2"
4	1	Ventana Acrilico
5	1	Tapon Limpieza 3"
6	1	Soporte de base
7	1	Tapa encapsamiento externa
8	1	Tapa encapsamiento interna
9	1	Base sistema electronico
10	1	Base camara
11	12	Tornillo #6x1/2"

TEC Tecnológico de Costa Rica				AREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA	REVISIÓN:
				PROYECTO: Diseño de módulo de grabación BRUVS	A
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL	DESIGNACIÓN:
XX			23/06/21	--	XXXXX
VERIF.					DENOMINACIÓN:
APROB.					--
FABR.				MATERIAL: XXX	
SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	Pieza:	ESCALA:
	LINEAL: .X ±0.005 .X ± .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±°		XXXX	Ensamblaje de diseño	2:1
			PESO: -- gramos	UNIDADES: mm	FORMATO: A3
				FIRMA	

8 7 6 5 4 3 2 1