



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de un módulo de control de lastre para un vehículo
submarino no tripulado*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Miguel Alegre Sacristán

DIRECTORES: Carlos Pérez Collazo
José Antonio González Prieto

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de un módulo de control de lastre para un vehículo
submarino no tripulado*

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General / Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado sobre el diseño de un módulo de lastre para un submarino no tripulado, tratará acerca del desarrollo de la Industria 4.0 y su correspondiente implementación, tanto en productos globales con fines puramente sociales, como en proyectos de desarrollo militar como son los drones, o submarinos no tripulados, para la realización de estudios sobre el ambiente marino.

Además, para la elaboración de dicho sistema de lastre perteneciente a este vehículo submarino no tripulado se utilizarán, para su diseño, herramientas de software como FluidSim, Inventor, AutoCAD o Arduino. También se realizarán cálculos para el estudio de las presiones y las posibles iteraciones a realizar por parte del sistema mediante el estudio de las leyes de los gases para conseguir que el módulo funcione correctamente. Para ello se contará con dos sistemas de uso simultaneo, uno hidráulico y otro neumático, lo que nos dará la capacidad de realizar este módulo de manera más sencilla. Por otro lado, cada uno de estos sistemas estará complementado con su correspondiente parte electrónica y sensores específicos, tanto de presión de aire como presión del flujo del agua para un correcto funcionamiento del módulo, esto se implementará a través de la programación y uso de Arduino.

PALABRAS CLAVE

Módulo de lastre, Software, Leyes, diseño, sistemas hidráulico y neumático

AGRADECIMIENTOS

En este apartado me gustaría hacer especial mención a aquellas personas que me han acompañado en la larga elaboración de este proyecto, desde un punto de vista académico, pero también y lo más importante desde el apoyo moral e incondicional a lo largo de no solo estos meses de trabajo, sino de los 5 años de formación militar.

En primer lugar, me gustaría mencionar a mis 2 tutores, ya que sin su ayuda y especial atención el desarrollo de este proyecto no hubiese sido posible. En este aspecto, me gustaría destacar el claro esfuerzo realizado por el Sr. González Prieto, que desde su casa y con gran esfuerzo y sacrificio ha estado dispuesto a ayudarme en todo momento y ha sido un apoyo fundamental en la elaboración de este TFG.

También quisiera agradeceré a mi familia y a mi pareja por el apoyo incondicional recibido siempre, y más durante este último curso académico donde más pacientes han sido conmigo y más me han demostrado este apoyo. Pero sobre todo a mis padres por su apoyo incondicional, por ser mis referentes. Su ejemplo de dedicación ha sido la base de todo mi trabajo.

En el ámbito laboral, querría mencionar a 3 personas en específico que han sido siempre para mis modelos a seguir y ejemplos, no solo de cómo ha de ser un militar y los valores que ha de tener, como el espíritu de sacrificio o el compañerismo (valores los cuales poseen y aplican en su día a día) sino como personas y sin los cuales hoy en día yo no estaría probablemente ejerciendo esta profesión, la cual, se ha convertido en mi vocación. Estos son el AN Carlos Alegre, Tte. Santiago Gómez y Tte. Yago López, gracias.

Por último y no menos importante a los componentes de la “Patrulla ALPHA” a los cuales me gustaría dedicar en especial unas palabras muy concretas: “La patrulla lo es todo, sin la patrulla no soy nada.”, y en general a la promoción 425-155 sois un ejemplo de lucha, resiliencia y sacrificio por el cuerpo, con los cuales he compartido grandes vivencias que nunca olvidaremos.

A mis padres por su apoyo incondicional, por ser mis referentes. Su ejemplo de dedicación ha sido la base de todo mi trabajo.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción y objetivos	8
1.1 Introducción	8
1.2 Objetivos	8
1.3 Estructura	9
2 Estado del arte	10
2.1 Industria 4.0	10
2.2 Guerra 4.0.....	11
2.3 Vehículos autónomos	13
2.3.1 Vehículos autónomos implementados en el mundo militar.....	14
2.3.2 Scaneagle	14
2.3.3 REMUS 600.....	14
2.3.4 Black Hornet 3	15
2.4 Vehículos submarinos no tripulados	15
2.4.1 Clases de vehículos submarinos no tripulados	17
2.4.2 Subsistemas de los vehículos submarinos no tripulados	18
2.5 Sistema de control de lastre en submarinos	19
2.6 Sistema de control de lastre por aire a presión.....	20
2.6.1 Expulsión del agua y Emergencia controlada.....	22
2.6.2 Integración de una bolsa flexible de goma	22
2.6.3 Componentes y gestión del sistema.....	23
2.7 Sistemas de lastre en los submarinos clase S-70 Y S-80 de la Armada Española.....	24
2.7.1 Clase S-70.....	24
2.7.2 Clase S-80.....	25
3 Diseño conceptual	28
3.1 Modelo teórico	28
3.1.1 Ley de Charles	28
3.1.2 Ley de Gay-Lussac	29
3.1.3 Ley de Boyle.....	30
3.1.4 Ley de Avogadro	31
3.1.5 Ley de los gases ideales	32

3.1.6 Estudio del número de iteraciones viables por parte del sistema de lastre	33
3.2 sistema de lastre	36
3.2.1 FluidSim	36
3.2.2 Propuesta del sistema de lastre	36
3.2.3 Sistema neumático	37
3.2.4 Sistema hidráulico	38
3.3 Propuesta de modelo físico	40
3.3.1 Tanque de lastre	41
3.3.2 Soporte de sistema	41
3.3.3 Soporte del sistema electrónico	42
3.3.4 Conector sistema - botella de CO ₂	44
3.4 Diseño del modelo digital	44
3.4.1 Propuesta de sistema	45
4 Materiales y métodos.....	48
4.1 Sistema neumático	48
4.1.1 Componentes del sistema	48
4.2 Sistema hidráulico.....	54
4.2.1 Componentes	54
4.3 Componentes electrónicos del sistema de módulo de lastre	57
4.3.1 Sistema Arduino	57
4.3.2 Componentes electrónicos	59
4.3.3 Propuesta de diseño de los elementos electrónicos	62
4.4 Soporte del sistema	62
4.4.1 Software del diseño.....	62
4.4.2 Impresión 3D	63
4.4.3 Cortado laser	65
4.5 Método de ensayo	66
5 Resultados / Validación / Prueba.....	70
5.1 Resultados de los ensayos	70
5.1.1 Ensayo aislado del sistema hidráulico	70
5.1.2 Ensayo aislado del sistema neumático.....	71
5.1.3 Ensayo íntegro del módulo de lastre.....	72
6 Conclusiones y líneas futuras	76
6.1 Conclusiones	76
6.2 Líneas futuras	76

7 Bibliografía.....	78
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	85
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	86
ANEXO III: FICHA DE DATOS DEL CARTUCHO CO₂	87
ANEXO IV: CÓDIGO DE PRUEBA DEL SENSOR DE PRESIÓN HIDRÁULICO	95
ANEXO V: CÓDIGO DE PRUEBA DE ELECTROVÁLVULAS HIDRÁULICAS	96
ANEXO VI: CÓDIGO DE PRUEBA DEL SISTEMA HIDRÁULICO	97
ANEXO VII: CÓDIGO DE PRUEBA DEL SENSOR DE PRESIÓN NEUMÁTICA.....	99
ANEXO VIII: CÓDIGO DE PRUEBA DE VÁLVULAS DEL SISTEMA NEUMÁTICO	100
ANEXO IX: CÓDIGO DE PRUEBA DEL SISTEMA NEUMÁTICO.....	101
ANEXO X: CÓDIGO DEL SISTEMA DE MÓDULO DE LASTRE	103
ANEXO XI: PLANOS	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 composición de la Industria 4.0 [4].	10
Figura 2-2 Fotografía de un vehículo autónomo para la desactivación de explosivos [9].	12
Figura 2-3, Figura 2-4 Imagen de la inclusión en la armada de la IA para su uso en planeamientos de operaciones y simulaciones de averías en unidades de la flota [11].	12
Figura 2-5, Figura 2-6 Imagen de gemelo digital de unidades de la armada española [11].	13
Figura 2-7 Fotografía de despegue de un Scaneagle durante la operación Atalanta a bordo de la F-82 Victoria (Fuente propia).	14
Figura 2-8 Imagen de un Remus 600 [19].	15
Figura 2-9 Imagen del dron Black Hornet de la FNGE [21].	15
Figura 2-10 Fotografía tomada en el lanzamiento de un UUV durante una de las travesías del JSE a bordo de su XCV crucero de instrucción (Fuente Propia).	16
Figura 2-11 Imagen de los distintos tipos de vehículos marinos no tripulados [27].	18
Figura 2-12 Imagen del diseño y distribución de los tanques de lastres de un submarino convencional [29].	19
Figura 2-13 Imagen explicativa del funcionamiento de un sistema de control de lastre por aire a presión.	20
Figura 2-14 Imagen ilustrativa de la expulsión del sistema de lastre del agua almacenada al exterior.	21
Figura 2-15 Imagen de consola controladora del sistema de lastre del submarino S-71 Galerna (Fuente propia).	22
Figura 2-16 Imagen de interruptor magnético microswitch [40].	23
Figura 2-17 Fotografía tomada en sistema de control del módulo de lastre del submarino S-71 Galerna.	24
Figura 2-18 Imagen del sistema de soplado de los tanques de lastre en submarinos S-70 [42].	25
Figura 2-19 Imagen de las generalidades de la instalación de llenado y vaciado de lastres del submarino S-80[34].	26
Figura 2-20 Imagen del funcionamiento del sistema de soplado [34].	26
Figura 2-21 Imagen de la válvula de ventilación [34].	27
Figura 3-1 Imagen representativa de la ley de Charles [43].	28
Figura 3-2 Imagen representativa de la ley de Gay-Lussac [44].	29
Figura 3-3 Imagen representativa de la ley de Boyle [45].	30
Figura 3-4 Grafica representativa de la ley de Avogadro [46].	31
Figura 3-5 Grafica representativa de la ley de gases ideales [47].	32
Figura 3-6 Imagen del sistema del módulo de lastre diseñado inicialmente (Fuente propia).	37
Figura 3-7 Imagen del sistema neumático del módulo de lastre (Fuente propia).	38
Figura 3-8 Imagen del sistema hidráulico del módulo de lastre (Fuente propia).	39

Figura 3-9 Imagen del diseño del módulo de lastre (Fuente propia).....	40
Figura 3-10 Imagen del tanque de lastre (Fuente propia).....	41
Figura 3-11 Imagen del soporte de válvulas del módulo de lastre (Fuente propia).	42
Figura 3-12 Imagen del módulo eléctrico dentro del sistema de lastre (Fuente propia).	43
Figura 3-13 y Figura 3-14 Imagen de conector de botella de CO ₂ (Fuente propia).	44
Figura 3-15 Imagen de representación de la red de Petri del sistema (Fuente propia).	46
Figura 4-1 Imagen de botella de aire comprimido (Fuente propia).....	48
Figura 4-2 Imagen de electroválvula del sistema neumático (Fuente propia).....	49
Figura 4-3 y Figura 4-4, Imágenes de regulador de presiones desde distintas perspectivas (Fuente propia).	50
Figura 4-5, Imagen de válvula antirretorno empleada para cada una de las electroválvulas (Fuente propia).	51
Figura 4-6 Imagen de sensor de aire a presión (Fuente propia).	51
Figura 4-7 Imagen de tubo continente del aire a presión (Fuente propia).....	52
Figura 4-8 Imagen del pasamamparos en su posición de uso (Fuente propia).....	53
Figura 4-9 Imagen de conector de botella de CO ₂ (Fuente propia).....	53
Figura 4-10 Imagen de válvula solenoide del sistema hidráulico (Fuente propia).....	54
Figura 4-11 Imagen de válvula antirretorno del sistema hidráulico (Fuente propia).	55
Figura 4-12 Imagen de sensor hidráulico de presión conectado a protoboard (Fuente propia)	55
Figura 4-13 Imagen de tubo continente del agua de circulación del sistema hidráulico.....	56
Figura 4-14 Imagen del pasamamparos hidráulico a través de una de las paredes del tanque de lastre	57
Figura 4-15 Imagen de placa Arduino UNO[65].	58
Figura 4-16 Imagen de la pantalla principal de Arduino IDE (Fuente propia).	59
Figura 4-17 Imagen de placa Arduino UNO (Fuente propia).	60
Figura 4-18 Imagen del soporte de alimentación de baterías del sistema (Fuente propia).	60
Figura 4-19 Imagen de módulo de 4 relés de 5 VC (Fuente propia).....	61
Figura 4-20 Imagen de un diseño de Autodesk Inventor (Fuente propia).....	62
Figura 4-21 Imagen de un diseño de AutoCad (Fuente propia).	63
Figura 4-22 Imagen de documento Excel usado para consumos y características de piezas impresas (Fuente propia).	64
Figura 4-23 Imagen de cortadora laser produciendo la placa de soporte del sistema de módulo de lastre (Fuente propia).	65
Figura 4-24 Imagen de uso de software rdworksV8 (Fuente propia).....	66
Figura 4-25 Imagen de prueba del sensor de presión hidráulica (Fuente propia).	66
Figura 4-26 y Figura 4-27, Imagen de prueba de válvula hidráulica e Imagen del sistema hidráulico eléctrico configurado en su totalidad (Fuente propia).	67

Figura 4-28 Imagen de prueba realizada del funcionamiento del sensor de presión (Fuente propia).	68
Figura 4-29 Imagen de prueba realizada del funcionamiento de electroválvulas (Fuente propia).	68
Figura 4-30 Imagen de montaje del módulo de lastre completo (Fuente propia).	69
Figura 5-1 Imagen de nuevas válvulas antirretorno implementadas en el sistema hidráulico (Fuente propia).	70
Figura 5-2 Imagen de conectores en forma de “Y” adquiridos tras ensayo (Fuente propia).	71
Figura 5-3 Imagen de la prueba realizada del módulo hidráulico del sistema de lastre con la actualización de los nuevos elementos (Fuente propia).	71
Figura 5-4 Imagen de prueba de sistema neumático en vacío (Fuente propia).	72
Figura 5-5 Imagen de nueva pieza para incorporar el CO ₂ al sistema (Fuente propia).	72
Figura 5-6 Imagen de prueba del circuito eléctrico mediante módulo relé (Fuente propia).	73
Figura 5-7 Imagen de obtención de datos de los sensores de presión (Fuente propia).	73
Figura 5-8 Imagen de acople de botella de aire comprimido (Fuente propia).	74
Figura 5-9 Imagen del módulo de lastre tras experimentación (Fuente propia).	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Calculo del número de iteraciones posibles por parte del submarino no tripulado a 5 bar.	35
Tabla 3-2 Cálculo del número de iteraciones posibles por parte del submarino no tripulado a 3,61 bar.....	35
Tabla 3-3 Tabla de muestra de estados y transiciones dentro del sistema (Fuente propia).....	46
Tabla 4-1 Propiedades de los materiales utilizados para la impresión 3D [71].	64

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

En el ámbito de la ingeniería marina y la robótica submarina, el desarrollo de vehículos submarinos no tripulados (USV, por sus siglas en inglés) ha experimentado un avance significativo en las últimas décadas, impulsado por la necesidad de explorar entornos acuáticos con fines científicos, industriales y medioambientales. Estos sistemas autónomos requieren mecanismos precisos y eficientes para controlar su flotabilidad y maniobrabilidad, garantizando operaciones seguras y adaptables a condiciones variables. En este contexto, el módulo de lastre emerge como un componente crítico, permitiendo al vehículo sumergirse o emerger mediante la gestión controlada de su peso efectivo.

El presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) se enmarca en el diseño e implementación de un módulo de lastre innovador para un submarino no tripulado, basado en un sistema de tanques de agua cuya liberación se acciona mediante aire comprimido. A diferencia de los sistemas convencionales, que suelen emplear bombas mecánicas o lastres sólidos, esta propuesta busca optimizar la eficiencia energética, reducir la complejidad estructural y mejorar la respuesta dinámica del vehículo. El principio de funcionamiento se fundamenta en la expulsión controlada de agua almacenada en un tanque mediante la inyección de aire a presión, permitiendo ajustes rápidos y precisos en la flotabilidad del submarino[1].

Este proyecto no solo contribuye al campo de la ingeniería mecánica aplicada a la robótica submarina, sino que también ofrece una solución escalable y sostenible para vehículos de bajo coste, facilitando su uso en aplicaciones como la monitorización de ecosistemas marinos, la inspección de infraestructuras sumergidas o la recopilación de datos oceanográficos. La combinación de fundamentos teóricos, herramientas de modelado y pruebas prácticas refleja el enfoque multidisciplinar inherente a la ingeniería moderna, alineándose con las demandas tecnológicas actuales en el sector marino[2].

1.2 Objetivos

Este proyecto tiene como principal objetivo el diseño, elaboración y estudio de un módulo de lastre para su uso en un submarino no tripulado tipo Glider (o planeador submarino) elaborado por módulos. Para ello se emplearán aplicaciones de diseño como AutoCAD o Inventor, impresoras 3D para su fabricación, así como sistemas de computación para la programación del módulo. Para una realización satisfactoria de este proyecto, es necesario cumplir con los siguientes hitos clave:

- Estudio del Sistema neumático por aire a presión: para el desarrollo correcto del sistema es necesaria su comprensión y entendimiento del funcionamiento de sistemas ya existentes para su implementación en nuestro proyecto.

- Adaptación del sistema para el submarino no tripulado: este objetivo es fundamental para obtener un correcto funcionamiento del submarino adaptando las necesidades barométricas a nuestro proyecto particular en las condiciones en las que este se desarrolla.
- Diseño del módulo de lastre: estará enfocado a una correcta planificación de las distintas partes del módulo para dimensionar adecuadamente y de manera eficiente el aspecto funcional y económico.
- Integración del diseño en el módulo: empleo correcto de las herramientas de trabajo en el laboratorio, materiales y partes del sistema adecuadas para no sobredimensionar el módulo y permitir que su implementación sea correcta dentro del diseño modular del submarino.
- Programación del sistema para su trabajo independiente: dotar al sistema de los sensores necesarios con la programación adecuada para hacer posible la autonomía del sistema.

1.3 Estructura

Este Trabajo Fin de Grado contará con una estructura claramente diferenciada por 5 bloques principales.

El primero de ellos tratará de una introducción y una explicación del entorno en el que se encuentran los drones y vehículos autónomos en la actualidad, además de una profundización en la materia de este proyecto como son los módulos de lastre, iniciando con los de los submarinos convencionales como el submarino de la Armada española clase S-80, hasta el estudio del comportamiento de los vehículos no tripulados.

Posteriormente se analizará la propuesta de diseño de un sistema de módulo de lastre adecuado a un submarino no tripulado, en la cual se diseñarán sistemas tanto hidráulicos como neumáticos para su funcionamiento, se desarrollará el módulo a través de software de diseño y se programará un código para conseguir el funcionamiento adecuado de este vehículo no tripulado.

Por último, se llevará a cabo un montaje físico, en el cual se analizarán cada uno de sus componentes, así como sistemas usados y software empeñado, validando este montaje y diseño a través de distintas fases de experimentación que nos permitirán obtener conclusiones sobre la mejora y optimización del sistema y de los recursos empleados.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Industria 4.0

La transformación digital, conocida como Industria 4.0, está redefiniendo de manera integral los procesos productivos y organizativos en el contexto global [3]. Esta revolución se fundamenta en la convergencia de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, la automatización avanzada, la integración de sistemas ciberfísicos y el análisis de grandes volúmenes de datos (Figura 2-1), que permiten a las empresas replantear sus modelos de negocio y mejorar su competitividad en un entorno cada vez más dinámico y globalizado.

En este escenario, el relato de la digitalización se configura como un proceso en construcción, en el que se combinan evidencias de avances significativos con incertidumbres derivadas de la complejidad propia de integrar tecnologías disruptivas [3]. La evolución hacia una producción inteligente exige no solo la incorporación de nuevas herramientas tecnológicas, sino también la transformación de estructuras organizativas y la actualización de competencias en los recursos humanos, aspectos esenciales para aprovechar plenamente las oportunidades que brinda la digitalización.



Figura 2-1 composición de la Industria 4.0 [4].

El análisis de la adopción de la Industria 4.0 ha permitido identificar una serie de factores determinantes que inciden en el ritmo y la eficacia del proceso de transformación. Se ha evidenciado que, tanto en grandes empresas como en pequeñas y medianas organizaciones, existen elementos estructurales y estratégicos que facilitan o, por el contrario, dificultan la implementación de soluciones digitales [5]. Esta visión multidimensional resalta la necesidad de adoptar enfoques integrales que consideren la interacción entre variables tecnológicas, organizativas y culturales, lo que resulta clave para diseñar estrategias de innovación adaptadas a cada contexto.

Asimismo, la comparación con otros países europeos pone de relieve que, a pesar del consenso sobre los beneficios potenciales de la digitalización, las diferencias en políticas públicas, en infraestructura tecnológica y en la cultura organizacional generan variaciones significativas en el grado de adopción de las tecnologías emergentes [6]. Estas disparidades enfatizan la importancia de establecer marcos normativos y de inversión que impulsen la modernización industrial, favoreciendo la cohesión y la competitividad a nivel internacional.

Finalmente, los retos inherentes a la integración de la Industria 4.0 son evidentes en diversos sectores, donde la superación de barreras tecnológicas y la adaptación a nuevos paradigmas organizativos se convierten en desafíos imprescindibles. En particular, las pequeñas y medianas empresas, fundamentales para la economía, deben enfrentar procesos de cambio que van más allá de la mera incorporación de tecnología, abarcando también transformaciones en la gestión y en la cultura empresarial [5]. Este enfoque holístico resulta esencial para garantizar una transición efectiva y sostenible hacia un entorno productivo más inteligente y resiliente.

2.2 Guerra 4.0

El surgimiento de la denominada Guerra 4.0 representa una transformación paradigmática en la manera de concebir y ejecutar los conflictos armados, en la que convergen tecnologías avanzadas, sistemas autónomos y estrategias híbridas que trascienden las fronteras tradicionales del combate [7]. En el contexto del conflicto ucraniano, este nuevo modelo bélico se manifiesta de manera evidente a través de la integración de drones, inteligencia artificial y ciberataques, elementos que han revolucionado tanto la operatividad en el campo de batalla como la forma de gestionar la información y la comunicación.

La utilización de drones y vehículos no tripulados ha permitido la realización de operaciones de reconocimiento y ataques de precisión, reduciendo el riesgo para el personal y aumentando la capacidad de respuesta ante objetivos estratégicos [8]. Esta automatización del combate se complementa con algoritmos inteligentes que facilitan la toma de decisiones en tiempo real, posibilitando la anticipación de movimientos enemigos y la optimización de recursos en escenarios de alta incertidumbre. La sinergia entre estos sistemas ha contribuido a la creación de un entorno de combate más dinámico y adaptable, donde la velocidad y la precisión operativa se convierten en factores determinantes.



Figura 2-2 Fotografía de un vehículo autónomo para la desactivación de explosivos [9].

Paralelamente, la incorporación de la inteligencia artificial ha transformado la manera de procesar y analizar grandes volúmenes de datos provenientes de diversas fuentes, lo que permite identificar patrones, prever amenazas y ajustar estrategias de forma ágil [10]. Este avance tecnológico no solo optimiza los procesos de comando y control, sino que también abre nuevas posibilidades en términos de ciberdefensa y contramedidas, fortaleciendo la resiliencia de las fuerzas frente a ataques que operan en múltiples dimensiones.

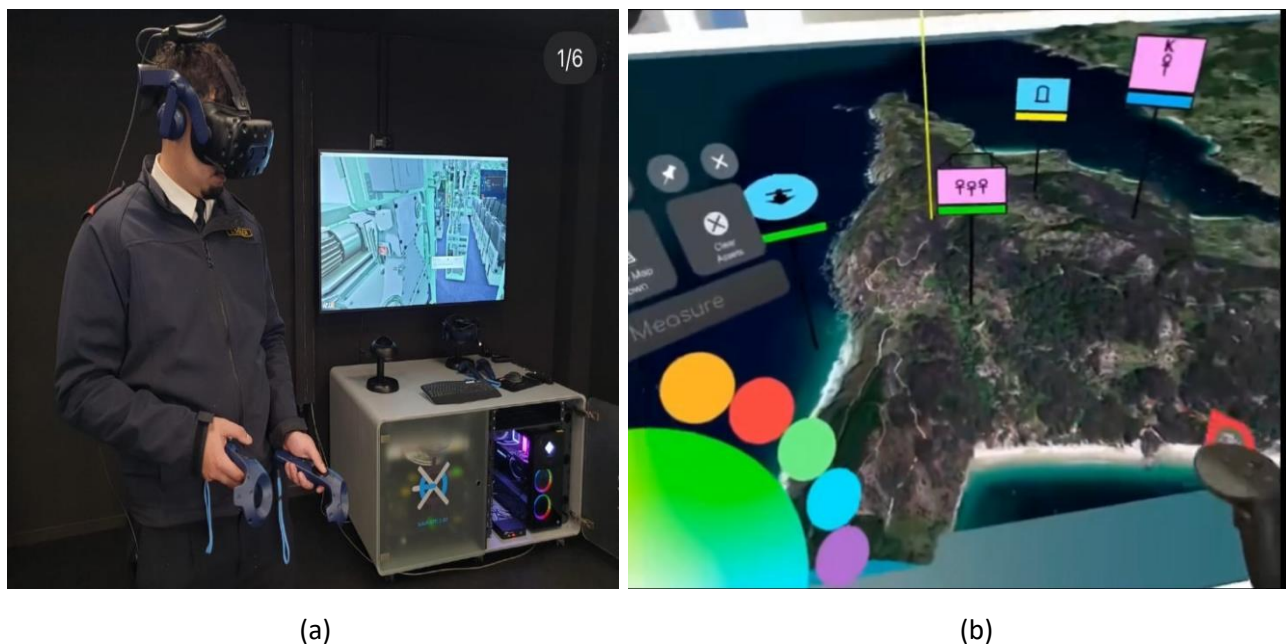


Figura 2-3, Figura 2-4 Imagen de la inclusión en la armada de la IA para su uso en planeamientos de operaciones y simulaciones de averías en unidades de la flota [11].

La dimensión cibernética adquiere una relevancia estratégica fundamental en este nuevo paradigma. Las operaciones de ciberguerra y las campañas de desinformación se han convertido en instrumentos clave para influir en la percepción pública y debilitar la potencia de combate relativa del enemigo. La capacidad para interrumpir comunicaciones, vulnerar sistemas de mando y controlar la narrativa informativa, evidencia cómo la guerra ha trascendido de lo puramente físico, consolidándose en una batalla que se libra tanto en el espacio digital como en el terreno convencional [12].

Una muestra clara de ello es la elaboración de los denominados Gemelos digitales, los cuales son representaciones virtuales, en tiempo real, de objetos, sistemas o procesos físicos. Se utilizan para simular, analizar y optimizar el rendimiento y funcionamiento de su contraparte en el mundo real, integrando datos obtenidos mediante sensores y otros dispositivos [7]. Esto permite predecir fallos, planificar mantenimientos y mejorar la eficiencia operativa en diversos sectores, así como facilitar la solución de problemas y adelantarse a la aparición de los mismos, lo cual, ofrece numerosas ventajas para las unidades.

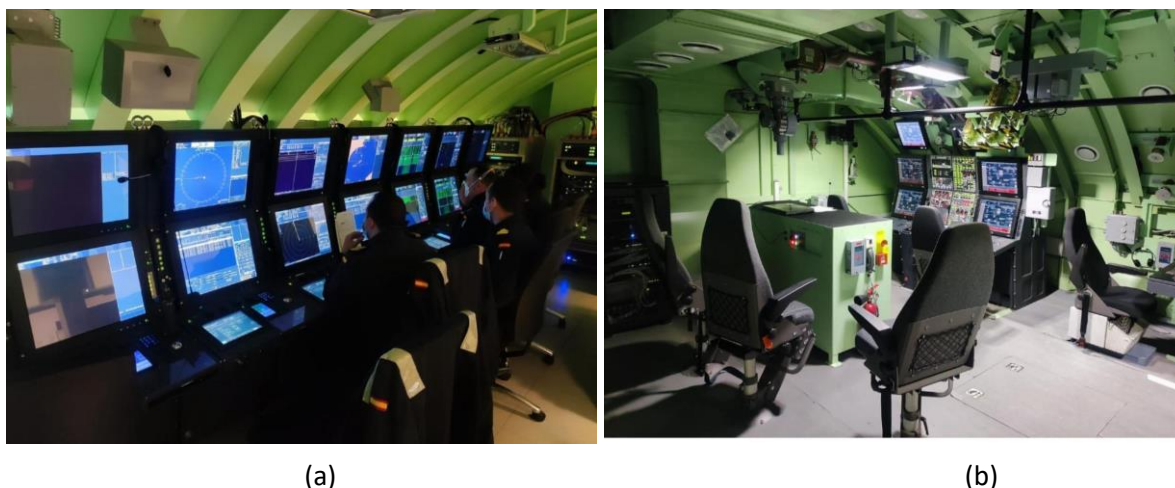


Figura 2-5, Figura 2-6 Imagen de gemelo digital de unidades de la armada española [11].

2.3 Vehículos autónomos

El avance de la tecnología de vehículos autónomos constituye uno de los desarrollos más prometedores en el ámbito de la movilidad actual, al integrar sistemas de inteligencia artificial, sensores de alta precisión y algoritmos de navegación que posibilitan la operación sin intervención humana. Este conjunto de innovaciones ha permitido que los vehículos se transformen en plataformas inteligentes capaces de interactuar de manera dinámica con su entorno, lo que abre la puerta a un futuro en el que la movilidad se reconfigure hacia modelos más eficientes y seguros [13].

El despliegue de inteligencia artificial en la conducción ha facilitado la creación de sistemas que procesan información en tiempo real, permitiendo anticipar y responder a situaciones complejas en el entorno vial. La combinación de tecnologías de comunicación y la implementación de redes de sensores avanzados refuerzan la capacidad de estos vehículos para integrarse en ecosistemas de movilidad conectada, donde la interacción con infraestructuras inteligentes y otros vehículos resulta crucial para la optimización del tráfico y la reducción de incidencias [14].

Más allá de los avances tecnológicos, los vehículos autónomos tienen implicaciones significativas en el ámbito de la salud pública y la sostenibilidad ambiental. La reducción potencial de accidentes y la optimización en la gestión del tráfico urbano pueden contribuir a disminuir los niveles de contaminación y a mejorar la calidad del aire, al tiempo que se favorece un uso más racional del espacio en las ciudades. Sin embargo, estos beneficios se encuentran condicionados por la existencia de un marco normativo adecuado que regule su integración en el entorno vial, siendo la ausencia de una regulación específica uno de los desafíos más relevantes para su implementación a gran escala [15].

2.3.1 Vehículos autónomos implementados en el mundo militar

En este apartado se dará especial relevancia a los avances e incorporaciones más significativas en el mundo operacional en cuanto a vehículos no tripulados o autónomos, los cuales han cobrado un papel de gran relevancia en conflictos actuales, como la guerra de Ucrania, y en unidades de todos los ejércitos del mundo al igual que en la Armada Española, con la presencia de medios como el Scaneagle, el submarino REMUS 600 y drones de pequeño tamaño como los utilizados por la FGNE, como es el mini dron Black Hornet.

2.3.2 Scaneagle

El ScanEagle destaca por su elevada autonomía y capacidad de recopilación de inteligencia, permitiendo la vigilancia aérea prolongada en escenarios complejos. Su diseño aerodinámico y discreto, junto con sistemas avanzados de comunicación, facilitan su integración en redes de mando y control modernas [16].



Figura 2-7 Fotografía de despegue de un Scaneagle durante la operación Atalanta a bordo de la F-82 Victoria (Fuente propia).

2.3.3 REMUS 600

El submarino no tripulado REMUS 600 sobresale por su robustez y precisión en la recogida de datos subacuáticos, desempeñándose eficazmente en misiones de inspección y desactivación de amenazas. Su avanzada tecnología de navegación y capacidad de inmersión prolongada aseguran un rendimiento óptimo en entornos marítimos exigentes, consolidándose como una herramienta estratégica en la defensa naval [17] [18].



Figura 2-8 Imagen de un Remus 600 [19].

2.3.4 Black Hornet 3

El mini dron Black Hornet se caracteriza por su tamaño reducido y alta maniobrabilidad, lo que le permite operar en entornos urbanos y espacios confinados sin ser detectado [20]. Equipado con sensores de alta resolución, este dron ofrece información crítica en tiempo real, siendo fundamental para operaciones de reconocimiento en zonas de alto riesgo.



Figura 2-9 Imagen del dron Black Hornet de la FNGE [21].

2.4 Vehículos submarinos no tripulados

En el mundo bélico, el uso de submarinos es un elemento esencial para el desarrollo de operaciones de gran relevancia sin que estas unidades sean detectadas por los medios de guerra antisubmarina de los que están dotados los buques de superficie actuales. Estos realizan operaciones de espionaje y de captación de inteligencia información en gran parte de estas ocasiones. Sin embargo, hay ocasiones en las que el uso de los submarinos convencionales no siempre es posible, por ello el uso de submarinos no tripulados se están convirtiendo en una cuestión cada vez más relevante [22]. En el ambiente militar, para su empleo en operaciones de vigilancia o reconocimiento recopilando inteligencia sin el uso de una dotación arriesgando así vidas y medios, lo cual podría suponer un elevado coste tanto material, como humano y económico. Ya que entre las capacidades de los UUV también destacan las de detección y

neutralización de minas u otro tipo de artefactos explosivos, la detección de amenazas subacuáticas y el apoyo en operaciones de guerra antisubmarina [23].

Además de toda esta amplia gama de usos militares destinados a las fuerzas armadas, muchas empresas civiles de muchos países, entre los que se encuentra España, emplean y desarrollan estos AUV para la elaboración de estudios e investigaciones oceanográficas, monitoreo ambiental, inspección y mantenimiento de infraestructuras sumergidas (como tuberías y plataformas petrolíferas) y labores de búsqueda y rescate en el medio marino [24].

Dentro de estos estudios e investigaciones, la Armada Española es una gran aportadora de recursos y medios para el estudio del medio marino [25], un ejemplo de ello es el proyecto científico de la universidad de Cádiz llevado a cabo en el Buque Escuela Juan Sebastián de Elcano (Figura 2-10), donde tiene lugar el adiestramiento en la mar por parte de los alumnos de la Escuela Naval Militar durante su tercer año como alumnos a oficiales de la armada donde colaboran estrechamente para el estudio de la salinidad, temperatura y corrientes del medio marino en distintos puntos de los diferentes océanos.



Figura 2-10 Fotografía tomada en el lanzamiento de un UUV durante una de las travesías del JSE a bordo de su XCV crucero de instrucción (Fuente Propia).

La capacidad de los AUV de operar de manera autónoma o ser controlados remotamente les permite trabajar en entornos difíciles o peligrosos, extendiendo el alcance de las operaciones subacuáticas y ofreciendo datos en tiempo real que pueden ser críticos para la toma de decisiones.

2.4.1 Clases de vehículos submarinos no tripulados

Actualmente, una de las lecciones aprendidas del conflicto entre Rusia y Ucrania por parte de las naciones es el desarrollo de vehículos no tripulados, ya que estos permiten un desarrollo de guerra híbrida [26], pues permiten obtener datos de elevada importancia en el entorno operativo en el que actúan y además aportan una gran ventaja en cuanto a superioridad en el entorno marino se refiere, siempre y cuando no supongan pieza clave para conseguir una supremacía total del medio. Otro de los factores clave del desarrollo de estos medios es el bajo coste de producción con respecto de los medios convencionales y a su vez la sencillez de desarrollo.

Entre de los distintos vehículos autónomos marinos (*Unmanned Marine Vehicles*, UUVs) existe la posibilidad de que estos pertenezcan a dos vectores de desplazamiento posibles, los vehículos de superficie (*Unmanned Surface vehicles*, USV) y los vehículos submarinos (*Unmanned underwater vehicles*, UUV). Dentro de esta última clase se pueden destacar 3 principales tipos de vehículos entre los que se encuentran [26]:

- **Vehículos operados remotamente (*remote operated vehicle*, ROV):** son sistemas sumergibles no tripulados controlados desde la superficie mediante conexión por cable (cordón umbilical), utilizado tanto para transmisión de energía como para el control del vehículo. Este cable umbilical garantiza no solo el control remoto del vehículo, sino también la recepción instantánea de datos, imágenes, vídeos e información sobre el estado operativo del entorno en el que se encuentra. Toda esta información es transmitida hacia una estación que se encuentra en superficie a través de señales continuas entre dicha estación y el vehículo.
- **Vehículos submarinos autónomos (*autonomous underwater vehicle*, AUV):** la principal característica de la que disponen este tipo de vehículos es su operatividad sin la necesidad de intervención humana directa en ellos. Los AUVs no requieren conexión física con una estación en superficie, lo que les permite desarrollar misiones de manera independiente mediante una planificación previa y una capacidad de toma de decisiones propia durante su operación. Este tipo de vehículos navega de manera autónoma gracias a sistemas internos que combinan sensores, algoritmos de navegación y control, y almacenamiento de energía propio. Utilizan software avanzado como navegación inercial, GPS (cuando emergen a superficie), DVL (*Doppler Velocity Log*, es un sensor hidroacústico que se emplea en vehículos submarinos para medir la velocidad y la dirección respecto al fondo marino, basándose para todo ello en el efecto Doppler) y sonares que les permiten adaptarse a cada uno de sus cometidos asignados.
- **Planeadores submarinos (*Glider*):** son vehículos autónomos subacuáticos caracterizados por una gran eficiencia energética y autonomía. Estos vehículos destacan principalmente por la capacidad de desplazarse durante largos períodos empleando mecanismos de propulsión basados en cambios de flotabilidad, permitiendo realizar misiones prolongadas con un mínimo consumo energético. A diferencia de otros vehículos submarinos, los Gliders no utilizan hélices convencionales para su propulsión. En su lugar, emplean un sistema basado en la variación controlada de flotabilidad mediante una bomba hidráulica interna que modifica su volumen o distribución de masa interna. Estos cambios provocan ciclos continuos de ascenso y descenso, generando así un movimiento de desplazamiento horizontal gracias a la presencia de alas o superficies hidrodinámicas que convierten los movimientos verticales en avance horizontal, llegando a permitir extender la autonomía operativa de los mismos durante meses, sin necesidad de recuperación.

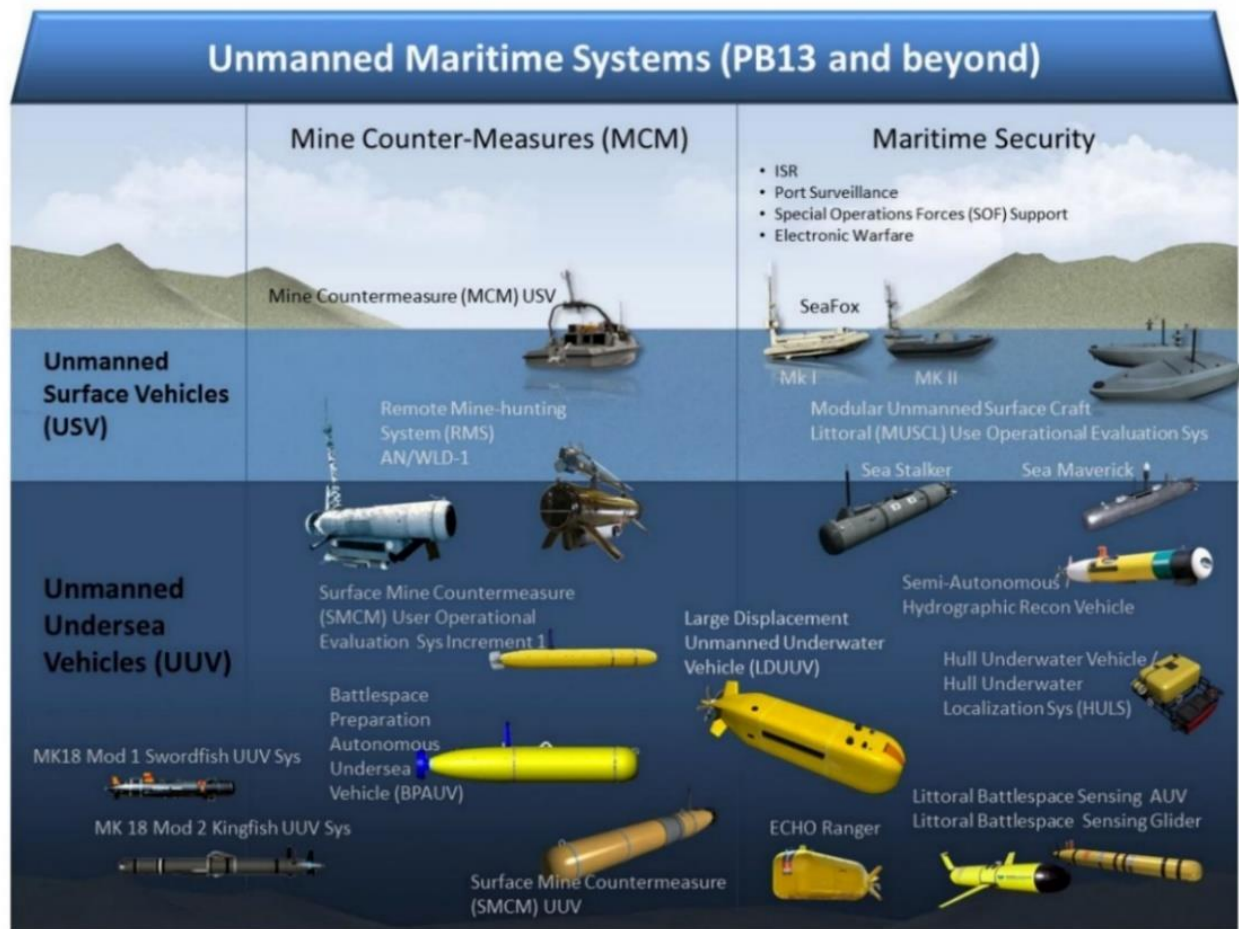


Figura 2-11 Imagen de los distintos tipos de vehículos marinos no tripulados [27].

2.4.2 Subsistemas de los vehículos submarinos no tripulados

El diseño y desarrollo de vehículos submarinos no tripulados implica una integración compleja de múltiples tecnologías, cada una encargada de una función específica dentro del sistema global. Estos vehículos, utilizados en entornos tan sofisticados y cambiantes, deben ser capaces de operar de forma autónoma o semiautónoma. Para ello, se dividen en una serie de subsistemas fundamentales, cada uno orientado a resolver un conjunto de tareas específicas necesarias para el funcionamiento del vehículo en su conjunto.

Para ello su diseño modular, permite adaptar el vehículo a diferentes tipos de misiones o condiciones operativas. Los principales subsistemas de estos vehículos son los siguientes [26]:

- **Control de lastre:** se encarga de gestionar de forma precisa el funcionamiento del módulo de lastre, regulando la entrada y salida del fluido que permite variar la flotabilidad del vehículo. Este subsistema incluye válvulas, sensores de presión y un sistema de control electrónico que ejecuta las órdenes del controlador principal. Su correcto funcionamiento es esencial para mantener la estabilidad y maniobrabilidad durante las fases de inmersión y emersión.
- **Energía y potencia:** suministra la electricidad necesaria para el funcionamiento de todos los componentes del vehículo, desde la propulsión hasta los sensores. Generalmente está compuesto por baterías recargables (como las de ion-litio)[28], sistemas de distribución y convertidores de voltaje. Su diseño debe optimizar la autonomía y garantizar un suministro estable y seguro. Una gestión eficiente de la energía es fundamental para prolongar el tiempo de operatividad del sistema.
- **Propulsión:** permite el desplazamiento del vehículo, siendo responsable del avance, retroceso y control de velocidad. Está formado principalmente por motores eléctricos y hélices o

propulsores, ubicados estratégicamente para proporcionar el movimiento deseado. Su diseño debe equilibrar eficiencia energética, potencia y silencio, especialmente en operaciones de investigación o militares.

- **Navegación y posicionamiento:** Este subsistema proporciona información sobre la posición, orientación y trayectoria del vehículo en todo momento. Incluye sensores como unidades de medición inercial (IMU), GPS (para uso en superficie), y dispositivos acústicos como el DVL y el USBL. La combinación de estos sensores permite una navegación precisa, incluso en entornos donde no hay señal GPS. Componentes críticos para garantizar que el vehículo siga correctamente los waypoints establecidos.
- **Maniobra:** está encargado de ajustar la orientación y posición del vehículo en los tres ejes (proa-popa, babor-estribor y vertical). Para ello utiliza propulsores auxiliares, timones o superficies de control, que permiten realizar giros, inclinaciones y correcciones de rumbo. Este subsistema trabaja en conjunto con el de navegación para ejecutar los movimientos planeados. Su eficacia determina la capacidad del vehículo para sortear obstáculos y mantenerse estable al afrontar las diferentes condiciones marinas como son las corrientes, oleajes y mareas.

2.5 Sistema de control de lastre en submarinos

En los últimos años se ha observado un creciente interés en el desarrollo de sistemas de control de lastre para submarinos, con el objetivo de mejorar la maniobrabilidad y la estabilidad tanto en condiciones operativas normales como en situaciones de emergencia.

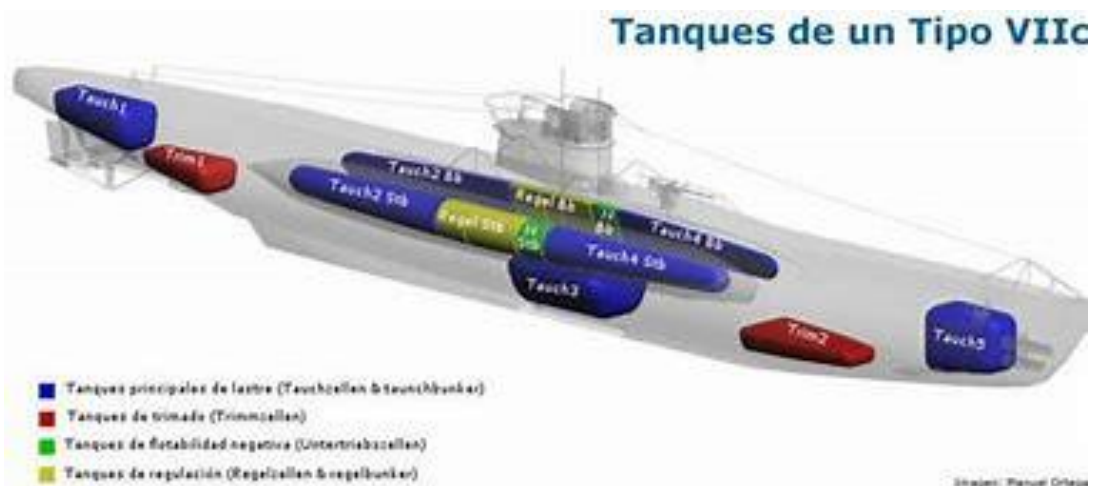


Figura 2-12 Imagen del diseño y distribución de los tanques de lastres de un submarino convencional [29].

Esto es debido a que, en los submarinos reales (tanto militares como civiles), el control de la flotabilidad se logra mediante estos sistemas mencionados, basados en el principio de Arquímedes. El buque cuenta con tanques de lastre que pueden llenarse de agua para aumentar el peso (permitiendo la inmersión) o vaciarse de agua al llenarlos de aire comprimido para reducir el peso (permitiendo la emersión). Al sumergirse, se abren válvulas de ventilación en la parte superior de los tanques, dejando escapar el aire interno y permitiendo la entrada de agua por orificios inferiores (puertos de inundación).

Este ingreso de agua incrementa la densidad total del submarino, provocando su inmersión controlada. Para volver a salir a superficie, se cierran las ventilaciones superiores y se inyecta aire a alta presión en

los tanques, expulsando el agua hacia fuera a través de las aperturas inferiores. La sustitución del agua (pesada) por aire (ligero) reduce el desplazamiento efectivo y genera flotabilidad positiva. Una vez en superficie, compresores de baja presión (soplantes) extraen el agua residual de los tanques para conservar el aire comprimido de a bordo. Este ciclo permite al submarino alternar entre navegación en superficie e inmersión. Aunque el principio básico es sencillo, mantener una profundidad estable es complejo: un submarino sumergido es inherentemente inestable y tiende o bien a hundirse más o a ascender debido a pequeños cambios de densidad del agua, consumo de peso (combustible, etc.) u otros factores.

Por ello [32], además de los tanques de lastre principales (utilizados para cambios grandes de flotabilidad), los submarinos suelen incorporar tanques de ajuste fino (trimado o compensación) con agua variable para equilibrar pequeños desbalances y mantener la estabilidad y ángulo deseados durante la navegación. Estos tanques más pequeños permiten un control de profundidad más preciso, soportando mayores presiones y operándose de forma continua durante la navegación para compensar factores como compresión del casco, variaciones de salinidad o consumo de masa interna. El control de profundidad también se complementa con superficies de control (planes o hidroplanes) que generan fuerzas hidrodinámicas al moverse, pero el sistema de lastre por aire a presión es el medio primario para lograr flotabilidad positiva o negativa del submarino.

2.6 Sistema de control de lastre por aire a presión

Los submarinos utilizan diversos sistemas de lastre para ganar flotabilidad y controlar su profundidad. Uno de los sistemas de lastre más comunes y efectivos es el de aire a presión, utilizado para expulsar el agua de los tanques de lastre, lo que permite al submarino emerger rápidamente a la superficie [33]. Este sistema tiene como objetivo facilitar las maniobras de ascenso y descenso, mejorando la maniobrabilidad y el control general del submarino en distintas condiciones de operación.

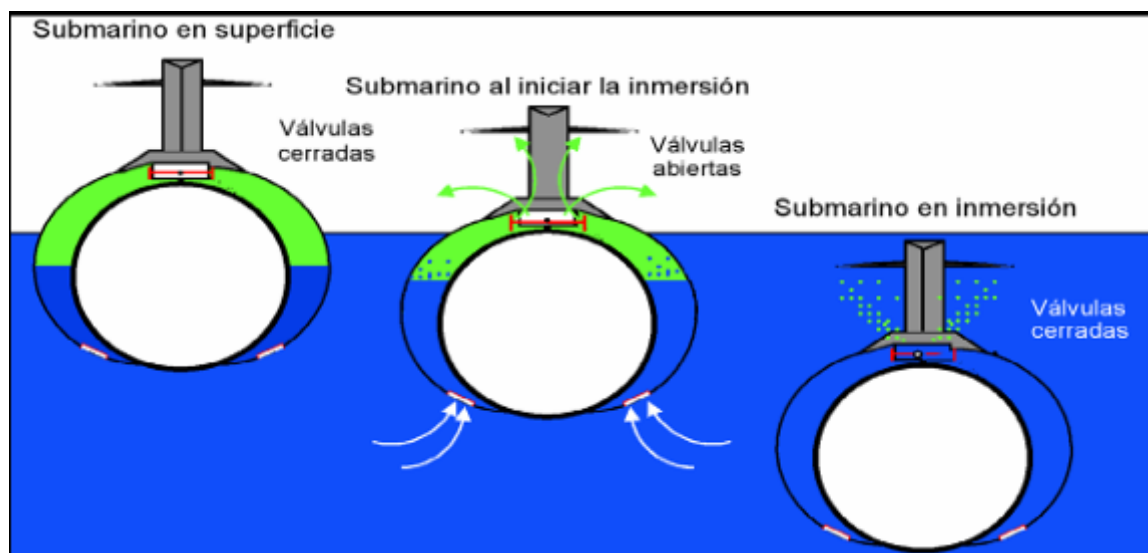


Figura 2-13 Imagen explicativa del funcionamiento de un sistema de control de lastre por aire a presión [34].

El sistema de aire a presión opera mediante la expulsión de agua de los tanques de lastre, lo que provoca que el submarino gane flotabilidad y ascienda hacia la superficie. Este proceso se activa generalmente cuando se inyecta aire comprimido en los tanques, desplazando el agua hacia el exterior.

La capacidad de expulsión de agua de manera eficiente es crucial para asegurar una respuesta rápida y controlable al momento de realizar maniobras. Los tanques de lastre, cuando se vacían de agua, permiten que el submarino ajuste su profundidad de manera precisa y rápida [35].

El diseño de la bolsa flexible dentro de los tanques de lastre es una característica fundamental en los sistemas de aire a presión. Esta bolsa, generalmente hecha de goma resistente, se encuentra dentro de un compartimento presurizado y puede ser de gran capacidad, permitiendo mantener hasta un 50% de aire de reserva, lo cual actúa como un mecanismo de seguridad adicional. La bolsa flexible tiene la función de incrementar la presión del aire dentro del tanque, maximizando la eficiencia de la expulsión del agua [36].

Se trata de una solución efectiva porque el aire contenido dentro de la bolsa se puede ajustar fácilmente según la necesidad de maniobra del submarino, garantizando un control preciso de las fluctuaciones de la flotabilidad sin peligro de desajustes incontrolables [37].



Figura 2-14 Imagen ilustrativa de la expulsión del sistema de lastre del agua almacenada al exterior [38].

Para todo ello son necesarios los componentes de control y seguridad dentro del sistema de lastre por aire a presión, entre los cuales podemos destacar varios componentes esenciales que aseguran su funcionamiento de manera segura y eficiente. Estos incluyen un compresor para la compresión del aire, una válvula solenoide para controlar su liberación y una válvula de retención que permite mantener la presión dentro del sistema. Todos estos elementos están alojados dentro de una cámara hermética, diseñada para resistir las altas presiones que se generan durante el trabajo de expulsión del agua.

Adicionalmente, se utilizan interruptores como los microswitch magnéticos o redswitch, activados por un imán que se mueve con la expansión de la bolsa, para dar una señal precisa sobre el estado de llenado de la bolsa de aire. Este sistema de control permite operaciones precisas de carga y descarga de agua, manteniendo un flujo constante y sin liberar burbujas durante su funcionamiento, lo que a su vez contribuye a la detección inmediata de cualquier fuga o anomalía en el sistema.

El sistema de lastre por aire es crucial para la operatividad eficiente de submarinos, proporcionando ventajas significativas en términos de control de la flotabilidad y respuesta rápida en situaciones de emergencia. La combinación de las tecnologías de aire comprimido, las bolsas flexibles y los complejos sistemas de control permite la optimización del rendimiento del submarino en una amplia variedad de condiciones operativas. Además, estos tanques de lastre generalmente se encuentran ubicados en el

exterior del casco de presión, su diseño robusto y la estructura de barras de acero incrementan la seguridad general del sistema.



Figura 2-15 Imagen de consola controladora del sistema de lastre del submarino S-71 Galerna (Fuente propia).

El diseño de los módulos de lastre por aire a presión en submarinos constituye una solución avanzada para optimizar la maniobrabilidad y la eficiencia en el control de la flotabilidad, aspectos críticos en el funcionamiento seguro de estas embarcaciones. Estos sistemas permiten expulsar el agua de los tanques de lastre mediante la inyección de aire a presión, facilitando la emergencia del submarino de manera controlada. A continuación, se presentan tres aspectos fundamentales en los que se basan estos diseños:

2.6.1 Expulsión del agua y Emergencia controlada

El primer y más crucial componente de un sistema de lastre por aire a presión es su capacidad para expulsar el agua de los tanques de lastre. En condiciones de inmersión, los tanques se llenan de agua para aumentar la masa y permitir que el submarino se sumerja. Para emerger, es necesario invertir este proceso, inyectando aire a alta presión en el compartimento. Esta acción crea una diferencia de presión que empuja el agua hacia fuera, modificando de manera rápida y controlada la flotabilidad del submarino.

La precisión en el control del flujo de aire es esencial, ya que una liberación demasiado rápida o incontrolada puede generar inestabilidad, mientras que un proceso demasiado lento puede comprometer la capacidad de respuesta en situaciones de emergencia. La implementación de algoritmos de control, que regulen parámetros críticos como el tiempo de establecimiento y el sobreimpulso, es clave para asegurar que el sistema logre una transición eficaz entre estados de inmersión y emergencia, garantizando que el submarino alcance la superficie de forma segura en el menor tiempo posible.

2.6.2 Integración de una bolsa flexible de goma

Un elemento distintivo en el diseño de sistemas de lastre por aire a presión es la incorporación de una bolsa flexible de goma dentro del compartimento presurizado. Esta bolsa actúa como un reservorio interno que puede almacenar hasta un 50% de aire de reserva, proporcionando una medida de seguridad adicional.

La función principal de esta bolsa es doble: en primer lugar, absorbe las variaciones bruscas de presión, permitiendo que el sistema mantenga una respuesta estable ante cambios repentinos en la carga

del tanque; en segundo lugar, actúa como un elemento de amortiguación que asegura la continuidad del suministro de aire en caso de fallos temporales en el compresor o en el sistema principal de inyección.

La selección del material para la bolsa es crítica, ya que debe ser lo suficientemente resistente como para soportar las altas presiones y la exposición constante a ambientes salinos y corrosivos sin perder flexibilidad ni integridad. Además, el diseño debe prever una verificación periódica de su estado mediante sensores de presión y dispositivos de diagnóstico, garantizando que el margen de aire de reserva se mantenga dentro de los parámetros de seguridad establecidos.

2.6.3 Componentes y gestión del sistema

La eficacia de un sistema de lastre por aire a presión depende en gran medida de la integración armónica de sus componentes y de la sofisticación de sus mecanismos de control. El sistema típicamente incluye un compresor de aire, encargado de generar la presión necesaria; una válvula solenoide, que regula de forma automatizada la inyección del aire en el tanque; y una válvula de retención o check valve, que impide que el aire retroceda, asegurando que se mantenga el flujo en la dirección deseada.

Para lograr un control preciso del llenado y la expansión de la bolsa de aire, se utilizan interruptores magnéticos del tipo microswitch o redswitch (Figura 2-16). Estos dispositivos se activan mediante un imán que se desplaza conforme la bolsa se expande, permitiendo al sistema ajustar automáticamente la cantidad de aire inyectada para mantener el equilibrio ideal entre presión y volumen [39].



Figura 2-16 Imagen de interruptor magnético microswitch [40].

La integración de estos componentes en una cámara hermética, diseñada para soportar la presión total del entorno submarino, es esencial para evitar la liberación de burbujas que pudieran comprometer la detección de fugas o generar ruido indeseado, elemento crítico en misiones de sigilo.

Además, la implementación de sistemas de control digital, que pueden incluir microcontroladores o plataformas basadas en Arduino, facilitando la supervisión en tiempo real y la automatización de las operaciones, aumentando así la seguridad y la eficiencia del sistema en su conjunto [41].

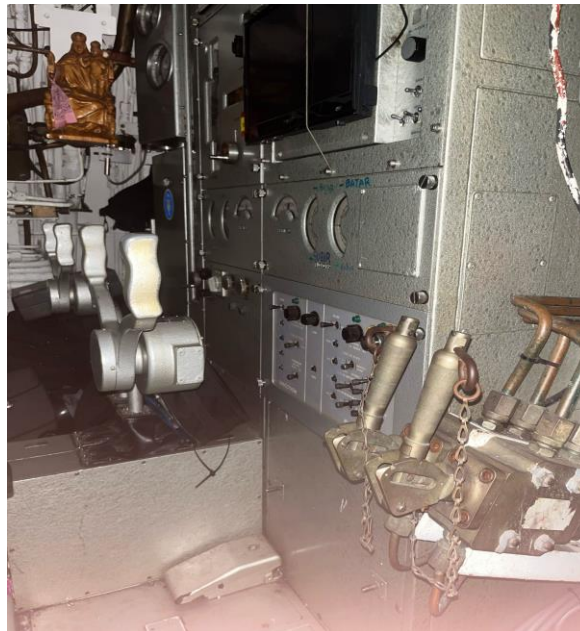


Figura 2-17 Fotografía tomada en sistema de control del módulo de lastre del submarino S-71 Galerna (Fuente propia).

2.7 Sistemas de lastre en los submarinos clase S-70 Y S-80 de la Armada Española

En la actualidad la Armada Española dispone de dos submarinos en activo, ya que la guerra submarina en España se encuentra en una fase de modernización con el desarrollo de la nueva clase de submarinos S-80, adaptada a las nuevas necesidades del panorama bélico actual y con nuevos y destacados sistemas como es el desarrollo del sistema AIP.

Sin embargo, el factor principal de estudio de este TFG es la evolución de los módulos de lastre entre estas dos clases de submarinos; así, se advierten diferencias notables entre ambas clases pues existe un desfase temporal de 40 años, debido al año de aparición de la clase S-70, año 1983, y la clase S-80, cuyo primer submarino (Isaac Peral) fue entregado a la Armada en el año 2023.

2.7.1 Clase S-70

Los submarinos pertenecientes a esta clase cuentan con 4 lastres, numerados de popa a proa. Donde el más grande es el lastre número 2.

Los lastres están en libre circulación con el agua en su parte inferior. Y tienen unos tapones (ventilaciones en su parte superior). Cada uno de estos lastres dispone de una única entrada o ventilación, excepto el lastre 2, que tiene dos, debido al tamaño del mismo. Existen dos tipos de maniobra a la hora del vaciado de los tanques, estas son:

1. **Maniobra de soplado de lastres (Figura 2-18):** El submarino cuenta con 3 compresores que se encargan de cargar unos grupos de aire alrededor del submarino (botellas enormes cargadas hasta 250kg/cm²) El aire almacenado en esos compresores tiene varias utilidades (lanzamiento de torpedos, izado de mástiles...) entre ellas, el soplado de los lastres. Unas “mangueras” inyectan aire a alta presión en la parte superior de los lastres para evacuar el agua por la parte inferior (cuando las ventilaciones están cerradas). Este soplado se lleva a cabo mediante un piano que dispone machos neumáticos.

Concretamente en esta unidad (S-71 Galerna) la voz para hacer superficie es la siguiente: “Superficie, soplar todos los lastres 25 segundos”.

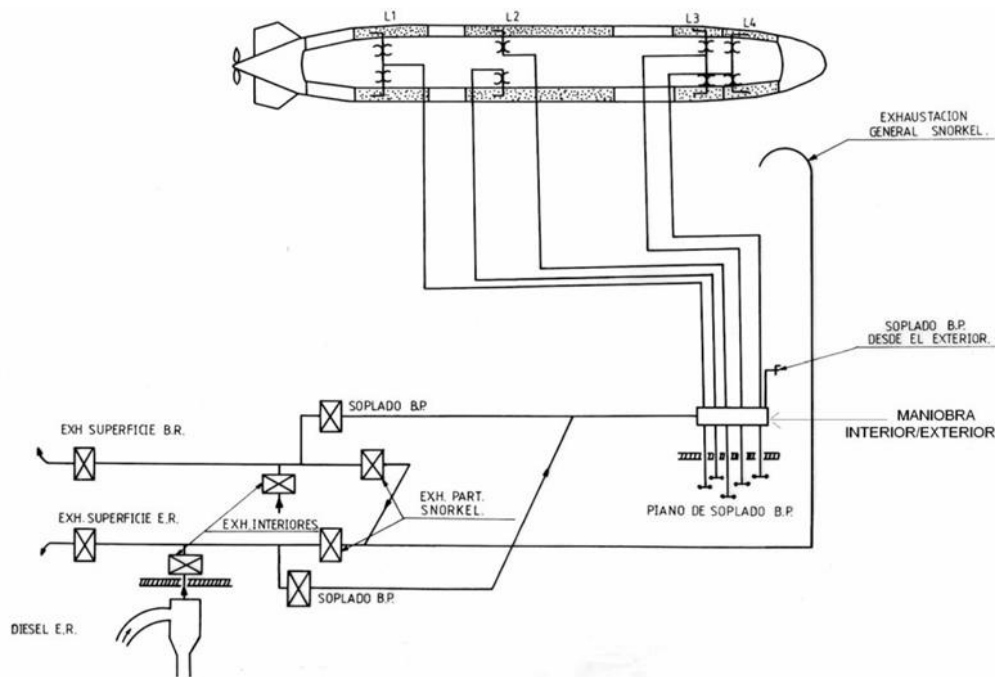


Figura 2-18 Imagen del sistema de soplado de los tanques de lastre en submarinos S-70 [42].

2. **Maniobra de ventilado de los lastres:** debido a las necesidades operativas de sumergir el submarino, se realiza una apertura de las ventilaciones de los lastres, favoreciendo que el aire se escape por la parte superior y entre así agua por la zona inferior ya mencionada. Esta maniobra es acciona por las manos de un suboficial mediante una palanca selectora. El desarrollo de la maniobra es el siguiente:
 - Cuando está el oficial en la vela, ordena abrir las ventilaciones 3, 1, 4 (en ese orden ya que se ha probado que es la forma óptima para llenar todos los lastres). Cuando estas ya se han abierto, el oficial va bajando y cierra la escotilla. Una vez en la cámara de mando se abren las ventilaciones del lastre 2 (al ser el más grande es el que más efecto tiene) [42]. En el momento en el que el submarino sobrepasa una profundidad determinada, se ordenan cerrar ventilaciones. De esta forma, el submarino navega siempre con las ventilaciones cerradas. Por si en algún momento tuviera que “soplar de emergencia”.

2.7.2 Clase S-80

El sistema de lastres del submarino S80 es el encargado de permitir que la nave pueda sumergirse y, de la misma forma, emerger a la superficie de forma segura. Para entenderlo de manera sencilla, imaginemos que el submarino tiene unos "tanques" especiales (los lastres) que pueden llenarse de agua o vaciarse según se necesite. Cuando se llena un tanque de lastre con agua de mar, el submarino aumenta su peso y pierde flotabilidad, lo que le permite hundirse. Para subir a la superficie, es imprescindible eliminar esa agua, y aquí es donde entran en juego las maniobras de soplado y ventilado.

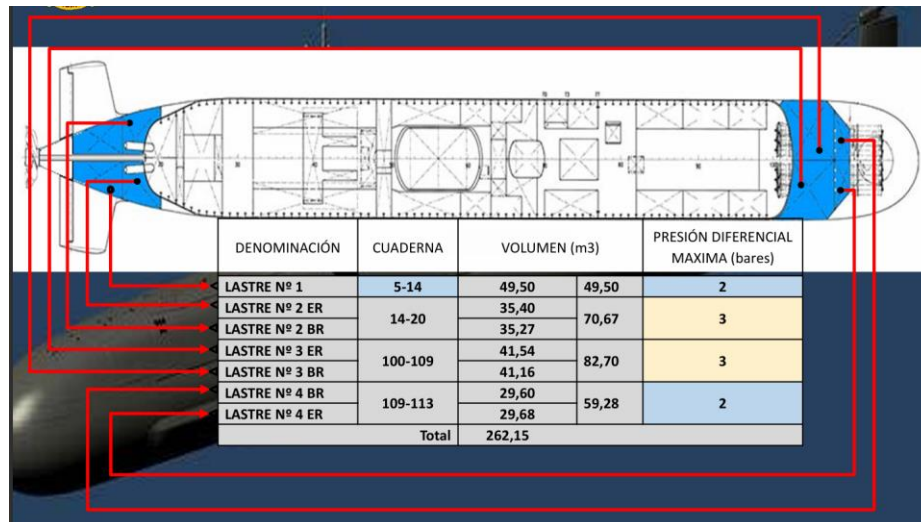


Figura 2-19 Imagen de las generalidades de la instalación de llenado y vaciado de lastres del submarino S-80[34].

Maniobra de soplado y ventilado:

- **Soplado:** Esta acción consiste en inyectar aire a muy alta presión (250 Kg/cm²) en los tanques. El aire forzado desplaza el agua que se encuentra en su interior, permitiendo que el submarino recupere la flotabilidad necesaria para emerger. Este proceso se lleva a cabo mediante dispositivos llamados distribuidores neumáticos, que liberan el aire de forma controlada y en un orden específico (por ejemplo, se suele seguir una secuencia que atiende primero a los tanques ubicados en determinadas posiciones, como del 4 al 1) para lograr un ascenso gradual y seguro.

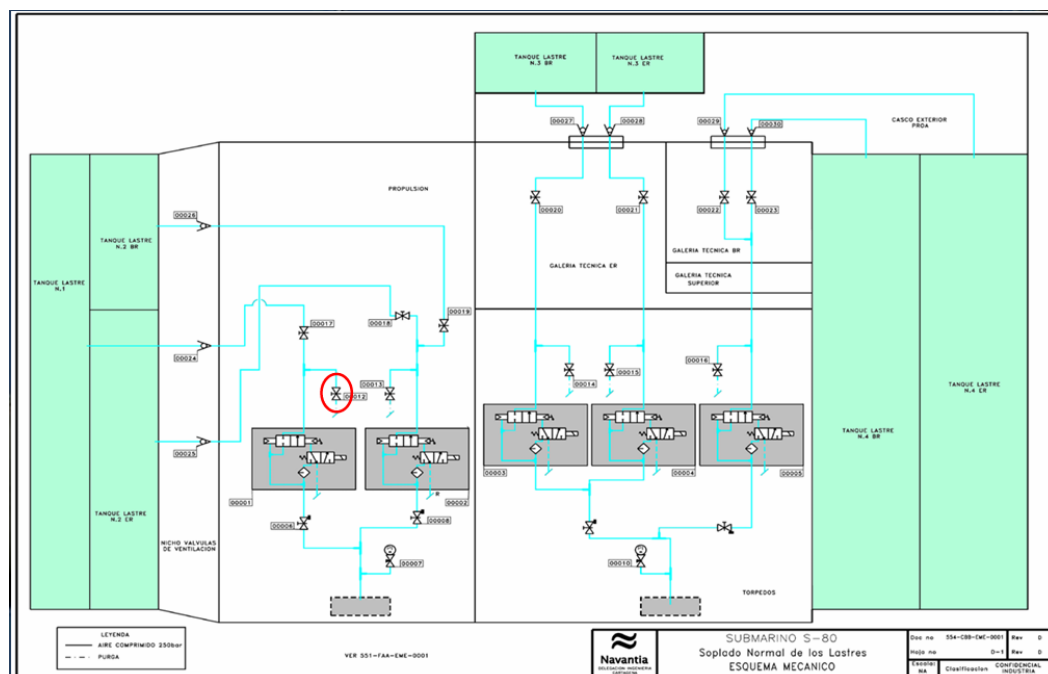


Figura 2-20 Imagen del funcionamiento del sistema de soplado [34].

- **Ventilado:** Paralelamente, cada tanque dispone de válvulas de ventilación ubicadas en su parte superior. Estas válvulas permiten la salida del aire contenido o, cuando se está llenando el tanque, facilitan la entrada de agua, asegurando así un intercambio eficiente. Los actuadores neumáticos

controlan la apertura y cierre de estas válvulas, evitando que se produzcan errores en la operación (por ejemplo, impidiendo la apertura sin que haya aire disponible).

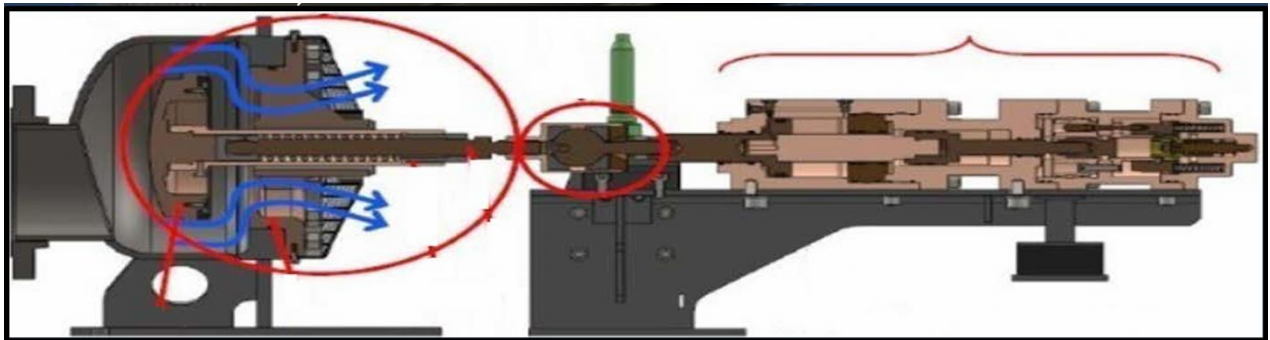


Figura 2-21 Imagen de la válvula de ventilación [34].

Características generales del sistema:

- El submarino cuenta con cuatro tanques principales (dos en la parte delantera (proa) y dos en la trasera (popa) que, en algunos casos, se dividen en compartimentos independientes para facilitar el control del balance y la estabilidad (además, uno de estos tanques dispone de mecanismos especiales para corregir la escora, es decir, el balance lateral respecto de su eje longitudinal).
- El sistema forma parte de un conjunto mayor que también incluye subsistemas para medir la cota (profundidad), la inclinación (nivelación de la nave respecto de la horizontal) y la escora, lo cual permite ajustar el peso y la flotabilidad en función de las condiciones de navegación.
- Además, existen dos modos de operación:
 - **Modo normal:** Se utiliza para las maniobras de superficie habituales, donde el soplado se efectúa de forma controlada mediante el uso de aire de alta presión, ya sea de forma remota (a través de sistemas de mando como el SICP o el SNIC) o de forma local (mediante el accionamiento manual en los distribuidores).
 - **Modo de emergencia:** Está diseñado para situaciones críticas, permitiendo evacuar el agua de ciertos tanques en cuestión de segundos, gracias a grupos específicos de botellas de aire que garantizan un caudal elevado [34].

3 DISEÑO CONCEPTUAL

3.1 Modelo teórico

Para la realización de este Trabajo Fin de Grado se ha llevado a cabo el análisis de tres modelos matemáticos basados en el estudio de las presiones, temperaturas y volúmenes así como las diferentes casuísticas en las cuales se han considerado alguno de estos elementos constantes, todo ello para que sea integrado en el cálculo de las posibles iteraciones a realizar por el módulo de lastre para permitir al submarino no tripulado ascender a superficie, sin necesidad de un cambio en su bombona de CO₂ a presión. Para todo esto mencionado anteriormente, los factores más relevantes serán el volumen del agua del taque de lastre y el volumen del CO₂ ocupado en la botella, así como la masa del mismo.

3.1.1 Ley de Charles

Esta ley de Charles o también denominada, ley de los volúmenes, es uno de los principios fundamentales de la termodinámica y de la teoría de los gases, se trata de una ley experimental de los gases donde tiene lugar la compresión de su reacción cuando estos sufren cambios en su temperatura al calentarse o enfriarse, produciéndose en estos una expansión o contracción de estos [43].

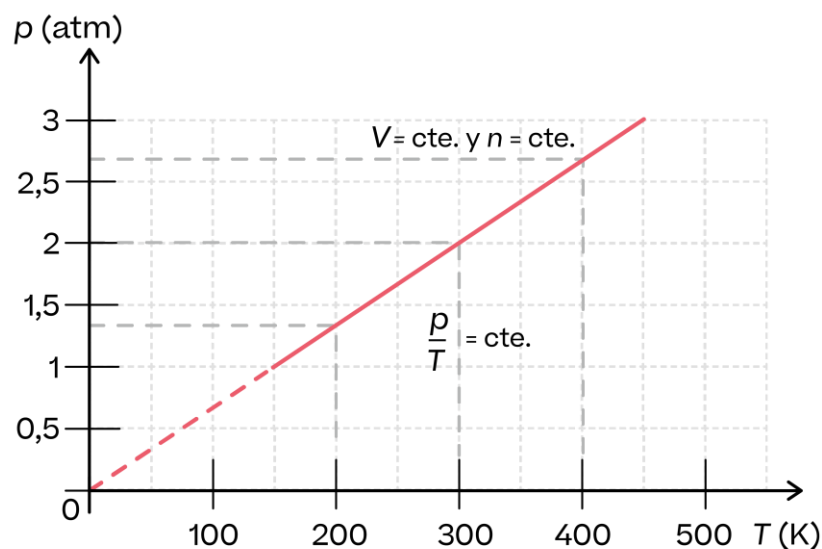


Figura 3-1 Imagen representativa de la ley de Charles [43].

Esto significa que en el caso de que la presión se mantenga constante, al aumentar la temperatura, el gas aumentará su volumen y viceversa.

Esta ley, reflejada en términos matemáticos, se expresa como:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (1)$$

Donde:

- V_1 y V_2 son los volúmenes inicial y final del gas.
- T_1 y T_2 son las temperaturas absolutas correspondientes en Kelvin.

Esta relación se fundamenta en observaciones experimentales, donde a medida que un gas se calienta a presión constante, éste aumentaba su volumen de forma casi lineal con la temperatura.

Es importante recordar que, para aplicar esta ley, se debe trabajar con la escala de temperatura Kelvin, ya que es una escala absoluta donde el cero (0 K) representa la ausencia total de energía térmica.

Para el desarrollo de este proyecto, esta ley no sería del todo efectiva ya que no tiene en cuenta el cambio de presiones que tendría lugar en el sistema de lastre, no se podría aplicar de manera correcta para un óptimo cálculo de iteraciones, ya que lo que va a determinar la pérdida de masa con cada actuación del módulo va a ser la diferencia de presiones de la botella de CO₂ con respecto del lastre.

3.1.2 Ley de Gay-Lussac

La ley de Gay-Lussac, o también conocida como la ley presión-temperatura, establece que, para una cantidad fija de gas confinado en un volumen constante, la presión es directamente proporcional a la temperatura absoluta (en Kelvin). Es decir, al aumentar la temperatura, las moléculas del gas se mueven más rápido y chocan con mayor frecuencia y fuerza contra las paredes del contenedor (lo que en este caso estaría materializado con la botella de CO₂), por lo que incrementa la presión[44].

De forma matemática se expresa como:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (2)$$

De forma gráfica se representa como:

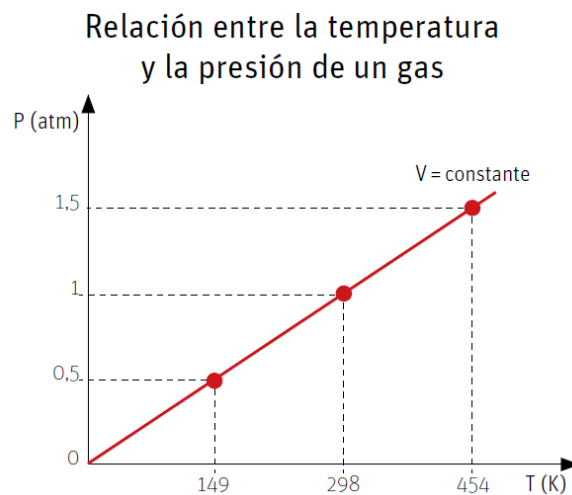


Figura 3-2 Imagen representativa de la ley de Gay-Lussac [44].

Donde:

- P_1 y P_2 son las presiones inicial y final,
- T_1 y T_2 son las temperaturas absolutas correspondientes, y
- k es una constante que depende de la cantidad de gas y del volumen.

Esta ley se fundamenta en el comportamiento de los gases ideales y es válida siempre y cuando se mantenga el volumen constante y el gas se comporte de manera ideal, lo que es aproximado en condiciones de baja presión y altas temperaturas, por ello, este modelo de estudio de los gases no es válido para la realización de los cálculos a cerca de las posibles iteraciones por parte del módulo de lastre para la inmersión y ascenso de nuestro submarino no tripulado.

3.1.3 Ley de Boyle

La ley de Boyle o más conocida como ley de Boyle – Mariotte, trata de explicar el comportamiento de los gases en casuísticas donde, los gases que actúan son tratados para una cantidad fija del mismo y bajo una temperatura constante, donde los cambios se verían reflejados en los volúmenes inicial y final, así como en las presiones. Concretamente esta ley determina que la presión que se ejerce sobre un gas será siempre proporcional a su volumen, por lo que, si aumenta el volumen de un gas la presión disminuirá y al contrario [45].

Esta ley se puede expresar matemáticamente bajo los siguientes conceptos:

$$V \propto \frac{1}{P} \quad V = \frac{K}{P} \quad V \times P = K \quad (3, 4, 5)$$

A través del análisis de todas estas expresiones obtenemos que:

$$V_1 \times P_1 = V_2 \times P_2 \quad (6)$$

Donde:

- P_1 y P_2 son las presiones inicial y final.
- V_1 y V_2 son los volúmenes correspondientes.
- K es la constante de proporcionalidad

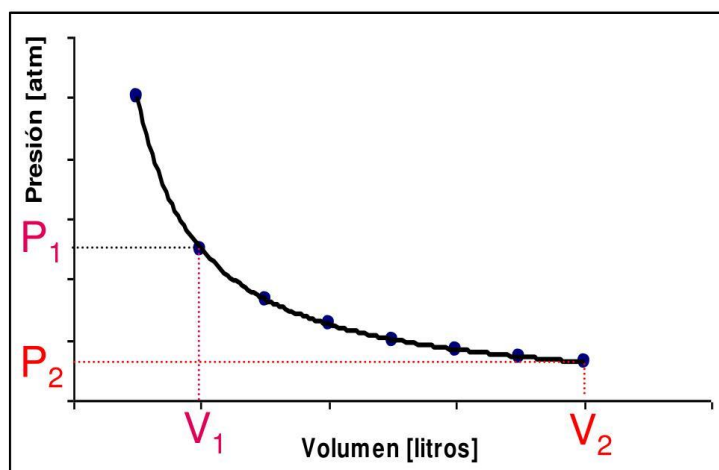


Figura 3-3 Imagen representativa de la ley de Boyle [45].

La ley de Boyle es fundamental en el diseño y funcionamiento de diversos dispositivos y procesos, como compresores, sistemas neumáticos y en la compresión de aire en buceo.

Por ejemplo, en un sistema de buceo, a medida que un buzo desciende y la presión ambiental aumenta, el volumen de los tanques de aire disminuye, lo que es un aspecto crítico a tener en cuenta para evitar problemas de seguridad y por tanto al igual que en el buceo es un hecho fundamental a tener en cuenta en el cambio de volúmenes y presiones de los submarinos convencionales y del submarino no tripulado de este proyecto.

3.1.4 Ley de Avogadro

La Ley de Avogadro establece que, a presión y temperatura constantes, el volumen de un gas es directamente proporcional al número de moles de gas presentes.

Por tanto, cuando se introduce más gas (mayor n), el volumen aumenta proporcionalmente, siempre que la presión y la temperatura se mantengan constantes. Esto significa que todos los gases ideales contienen el mismo número de moléculas por unidad de volumen en las mismas condiciones de temperatura y presión[46].

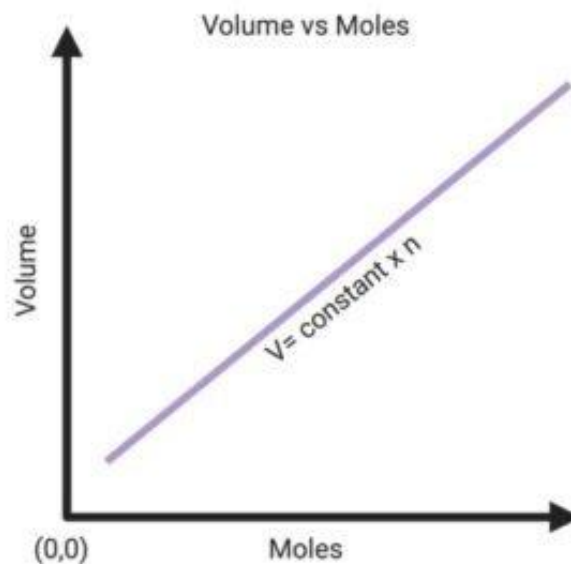


Figura 3-4 Grafica representativa de la ley de Avogadro [46].

Esta ley se basa en la hipótesis de Avogadro, que dice que volúmenes iguales de gases diferentes, medidos en las mismas condiciones de temperatura y presión, contienen el mismo número de moléculas. De esta hipótesis se deriva la constante de Avogadro:

$$N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol}$$

Esto representa el número de partículas (átomos, moléculas) en un mol de cualquier sustancia.

Matemáticamente esta ley se expresa como:

$$V \propto n \quad (7)$$

Que en forma de expresión matemática se formula como:

$$\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2} \quad (8)$$

Donde:

- V = volumen del gas (en litros, metros cúbicos, etc.).
- n = número de moles del gas.
- Los subíndices 1 y 2 representan dos estados distintos del gas.

3.1.5 Ley de los gases ideales

Tras el estudio de las anteriores leyes, comportamientos y aplicaciones de los gases podemos llegar a la conclusión de que para un cálculo adecuado del número de iteraciones posibles por parte de la botella de CO₂ con el sistema neumático, para empujar el agua depositada en el tanque de lastre del módulo y expulsarla a través del sistema neumático al medio marino para posibilitar su ascenso a superficie, necesitaremos una integración de las mismas para un adecuado uso combinado. Es por ello que para este estudio emplearemos la ley de los gases ideales [47].

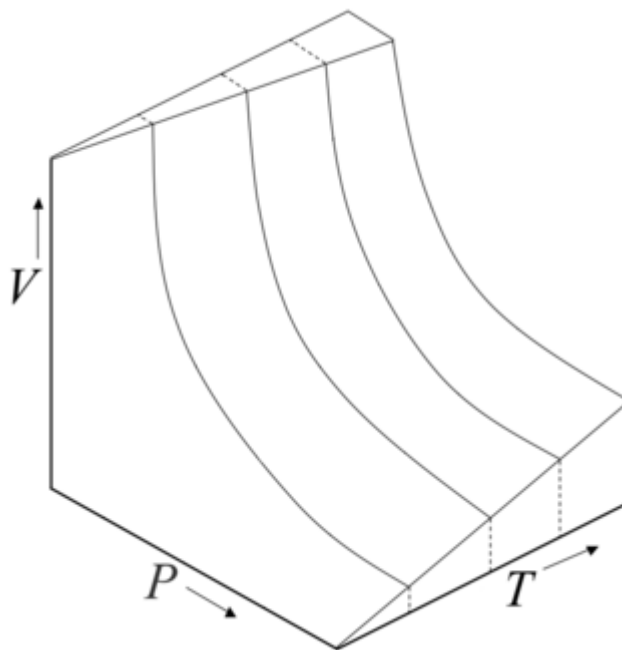


Figura 3-5 Grafica representativa de la ley de gases ideales [47].

La Ley de los Gases Ideales es una ecuación de estado que describe el comportamiento macroscópico de un gas ideal en función de su presión, volumen y temperatura. Se expresa matemáticamente como:

$$P \times V = n \times R \times T \quad (9)$$

donde:

- P = presión del gas (en atm, Pa, etc.).
- V = volumen del gas (en litros, metros cúbicos, etc.).
- n = número de moles del gas.
- R = constante universal de los gases (0,0821 L·atm/mol·K o 8,314 J/mol·K) $\times R$.
- T = temperatura absoluta del gas (en Kelvin, K) [48].

3.1.6 Estudio del número de iteraciones viables por parte del sistema de lastre

A través del uso y comprensión de los modelos matemáticos anteriormente estudiados, se ha seguido el siguiente proceso para la realización de los cálculos pertinentes, teniendo en cuenta 2 posibles casuísticas, cada una de ellas determinadas por el tipo de botella de CO₂, que se emplearía en el diseño:

Utilizando la fórmula de los gases ideales, donde:

- P es la presión,
- V es el volumen,
- n es el número de moles,
- R es la constante de los gases ideales
- T es la temperatura.

Dado que la temperatura y la constante de los gases ideales R son constantes, podemos simplificar la fórmula a $P \times V = n \times Constante$

El número de iteraciones que se podrán dar vendrán definidos por los siguientes datos supuestos (aunque los de la botella de gas no son definitivos y contamos con varias opciones).

- Presión inicial en la botella (P_2): 57,3 bar.
- Presión de operación del circuito (P_1): 5 bar /3,61 bar.
- Volumen del tanque de lastre (V_1): 1,5 litros.
- Volumen de la botella de gas (V_2): 13,67 litros de CO₂.
- Masa inicial de la botella de gas (M_2): 25 gramos.

Para cada iteración, el gas se libera de la botella y se utiliza para empujar el agua fuera del tanque de lastre. La presión en la botella de gas disminuirá con cada iteración. Los pasos a seguir en la realización de los cálculos son los siguientes:

1. Convertir la masa de gas a volumen:
 - La densidad del gas a 3,61 bar y 5 bar es aproximadamente constante.
 - 1 mol de gas ocupa 22,4 litros a 1 atm (1,01325 bar).
2. Calcular el volumen de gas necesario para cada iteración:

$$V_{necesario} = \frac{P_1 \times V_1}{P_2} \quad (10)$$

3. Calcular el número de iteraciones posibles (N):

$$N = \frac{V_{total}}{V_{necesario}} \quad (11)$$

En el caso de nuestro proyecto, va a ser utilizado una botella de 25 gramos de CO₂ (ver Anexo III) con una presión de recarga de 57,3 bar en condiciones normales (20 °C) [49], la cual será empeñada en un sistema que opera a 5 bar. Esto es debido a que el prototipo diseñado tiene una profundidad de operatividad máxima de 20 metros establecemos a través de la siguiente expresión matemática que:

$$P_{hidro} = \rho \times g \times h \quad (12)$$

Donde:

- $\rho = 1025 \text{ kg/m}$
- $g = 9,81 \text{ m/s}$
- $h = 20 \text{ m}$ (profundidad)

Sustituyendo:

$$P_{hidro} = 1025 \times 9,81 \times 20 = 200205 \text{ Pa} \quad (13)$$

Que pasando esta magnitud a bar (1 bar = 100000 Pa) implica:

$$P_{hidro} = \frac{200205 \text{ Pa}}{100000 \text{ Pa}} = 2,00205 \text{ Pa} \quad (14)$$

Por lo que si tenemos en cuenta la presión que ejerce la atmosfera bajo las condiciones anteriormente citadas y la presión que existe a la profundidad en la que operaria el submarino tenemos:

$$P_{total} = P_{atm} + P_{hidro} = 1,01325 + 2,00205 \text{ bar} = 3,015 \text{ bar} \quad (15)$$

Esto implica que para cada vaciado del tanque de lastre y permitir que el submarino ascienda a superficie necesitamos que el circuito neumático que aporte el aire a presión opere como mínimo a 3,015 bar, por ello y teniendo en cuenta que, a menor presión de gas utilizada en cada operación, tendrá lugar un menor consumo de la botella de CO₂, podemos establecer una presión de trabajo del gas de 5 o 3,61 bar, teniendo en cuenta un coeficiente de seguridad de $\sigma = 1,66$ para el primer caso y $\sigma = 1,20$ para el

segundo y así asegurar el funcionamiento del sistema en caso de existir una mayor presión bajo causas específicas al someter al submarino a situaciones incontroladas. El número de iteraciones posibles, es decir ascensos del submarino podrán ser los siguientes mostrados en la tabla de operaciones:

Iteraciones (N)	P_2 (bar)	V_2 (litros)	M_2 (gramos)	$V_{necesario}$ (litros)
1	57,3	13,67	25	1,5
2	51,01	12,17	24.76	1,5
3	44,73	10,67	24.49	1,5
...	...	...	...	...
8	7.0	1.67	21.14	1,5

Tabla 3-1 Calculo del número de iteraciones posibles por parte del submarino no tripulado a 5 bar.

Iteraciones (N)	P_2 (bar)	V_2 (litros)	M_2 (gramos)	$V_{necesario}$ (litros)
1	57,3	13,67	25	1,5
2	51,01	12,17	24.83	1,5
3	44,73	10,67	24.63	1,5
...	...	...	...	...
9	7.0	1.67	22.21	1,5

Tabla 3-2 Cálculo del número de iteraciones posibles por parte del submarino no tripulado a 3,61 bar.

A través de estas tablas (Tabla 3-1 y Tabla 3-2), podemos llegar a la conclusión de que el submarino, y más concretamente el sistema de lastre, podrá realizar un total de 8 iteraciones en el caso de que el sistema opere a 5 bar y 9 en el caso de que opere a 3,61 bar, esto es debido a que en el primer caso la presión restante en la botella no es suficiente para llevar a cabo el vaciado del agua del tanque de lastre.

Ante este análisis, la presión final que tendrá el sistema de módulo de lastre será de 5 bar, debido a que otorga una mayor fiabilidad en caso de situaciones inesperadas en las que la presión externa pueda aumentar y con ello la presión necesaria a aplicar en el interior del submarino.

3.2 sistema de lastre

3.2.1 *FluidSim*

En el desarrollo del presente proyecto se ha recurrido a diversas herramientas digitales con el objetivo de diseñar, simular y analizar el funcionamiento del sistema de lastre propuesto. La integración de software especializado ha permitido trabajar de manera coordinada en los aspectos neumáticos, hidráulicos y mecánicos del sistema, facilitando tanto la comprensión teórica como su posterior implementación práctica.

La herramienta principal de simulación empleada ha sido FluidSim, un software desarrollado por Festo Didactic [50], ampliamente utilizado en el ámbito de la automatización y la formación técnica. Este programa permite el diseño de circuitos neumáticos, hidráulicos y eléctricos, ofreciendo además la posibilidad de simular su comportamiento en tiempo real bajo distintas condiciones de operación.

Gracias a FluidSim, ha sido posible representar de forma gráfica y funcional el circuito del sistema de lastre, visualizar el comportamiento del aire comprimido a lo largo de las distintas fases de operación y comprobar la actuación de válvulas, sensores de presión y válvulas antirretorno sin necesidad de construir un prototipo físico previo. Esta capacidad de simular el flujo y la presión de los fluidos en el sistema ha resultado fundamental para optimizar el diseño y prever posibles fallos.

Asimismo, se ha hecho uso de Autodesk Inventor y AutoCAD como herramientas complementarias en el diseño del proyecto. Autodesk Inventor ha sido empleado para el modelado 3D de componentes específicos, como las piezas que conforman el tanque de lastre, las cuales han sido posteriormente fabricadas mediante impresión 3D. AutoCAD, por su parte, ha permitido el trazado preciso de planos técnicos y la preparación de documentación gráfica adicional que facilita la comprensión del sistema en su conjunto. Esta combinación de software ha permitido integrar la simulación neumática con la representación mecánica del montaje.

3.2.2 *Propuesta del sistema de lastre*

El sistema de lastre de este submarino no tripulado diseñado en este Trabajo Fin de Grado se compone de una parte puramente física, que la integrarían componentes como válvulas, tubos, reguladores de presión, pasamuros, etc. Y una parte electrónica compuesta principalmente por elementos de Arduino, donde va a ir integrada la programación de los sensores de presión tanto hidráulicos como de aire comprimido, que junto con una placa compuesta de 4 relés facilitarían el uso de estos sensores y válvulas del sistema.

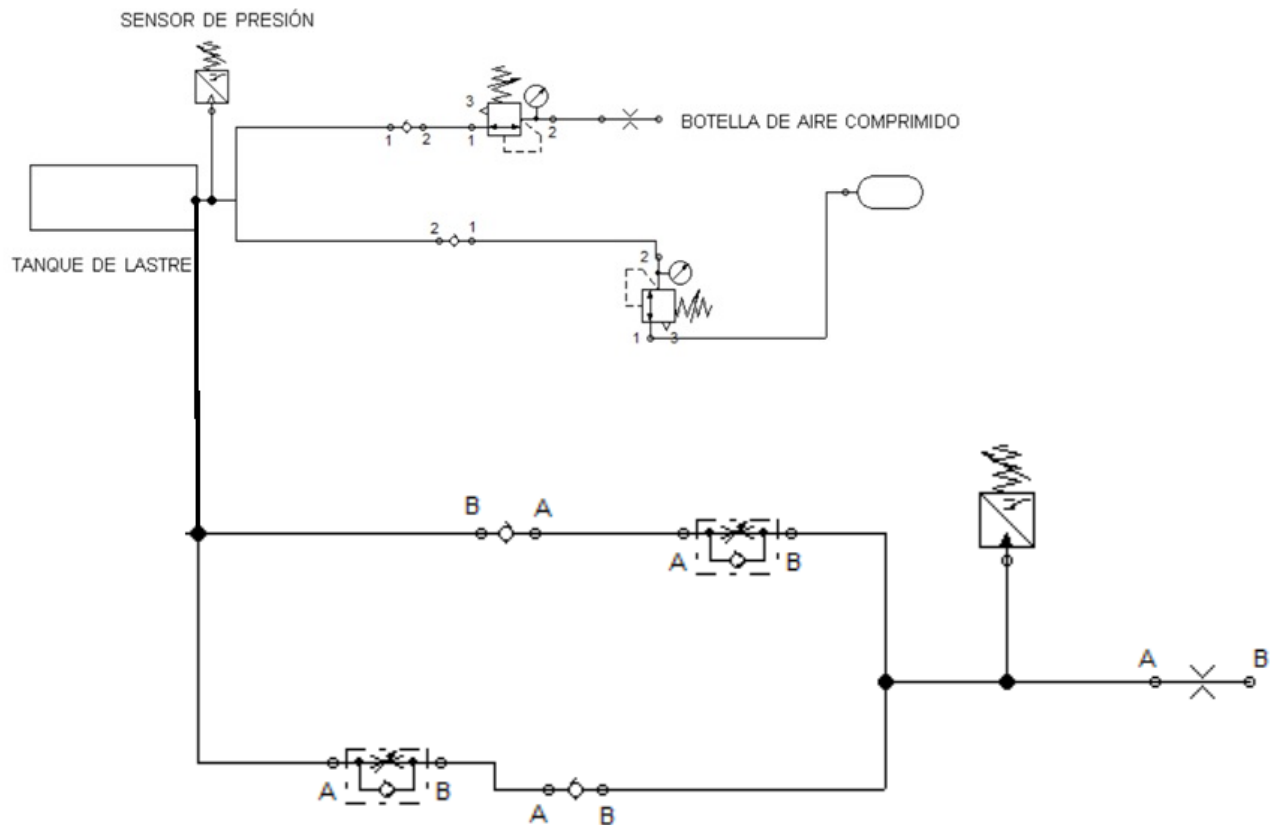


Figura 3-6 Imagen del sistema del módulo de lastre diseñado inicialmente (Fuente propia).

Este esquema inicial propuesto para el desarrollo del proyecto (Figura 3-6) se compone de cuatro elementos fundamentales, entre los que destaca el tanque de lastre. Este componente se materializa en el sistema como un espacio delimitado por dos piezas fabricadas mediante impresión 3D, diseñadas específicamente con el software Autodesk Inventor. Estas piezas actúan como paredes del tanque, permitiendo contener o desalojar el agua según la operación que se desee realizar, ya sea una inmersión o un ascenso del submarino.

A su vez el esquema (Figura 3-6), se ha llevado a cabo utilizando el software FluidSim. Este entorno no solo ofrece una amplia variedad de recursos para el diseño de sistemas neumáticos e hidráulicos, sino que también permite la realización de simulaciones dinámicas que reproducen el comportamiento de los fluidos bajo condiciones específicas. Esta funcionalidad es especialmente relevante en el presente proyecto, dado que el correcto funcionamiento del módulo de lastre depende directamente de la interacción entre los dos fluidos implicados: el aire comprimido y el agua.

Además de las ventajas mencionadas, FluidSim proporciona una visión anticipada tanto del resultado funcional del sistema como de las distintas configuraciones posibles, lo cual facilita una correcta disposición de los sensores de presión, válvulas y demás elementos de control dentro del esquema.

3.2.3 Sistema neumático

En lo que respecta al desarrollo del módulo de lastre dentro del sistema neumático (Figura 3-7), este se basa en el funcionamiento mediante la emisión de aire a presión proveniente de una botella de aire

comprimido. El gas es conducido a través de un tubo conector, que en el montaje físico del sistema se implementará utilizando un tubo de polietileno negro de 6 mm de diámetro.

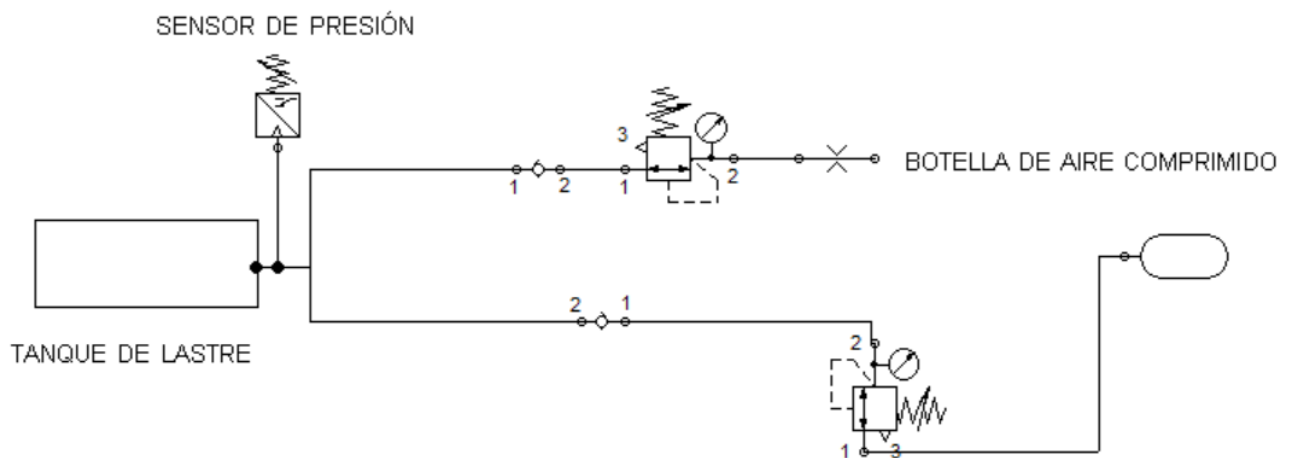


Figura 3-7 Imagen del sistema neumático del módulo de lastre (Fuente propia).

Este circuito se encuentra dividido en dos partes claramente diferenciadas. La primera de ellas es la encargada de permitir que el submarino ascienda hasta la superficie. Para ello, el sistema se inicia con una botella de aire comprimido (CO_2), la cual actúa bajo demanda. Esta botella libera gas a través del circuito mediante la acción de un regulador de presión, que permite ajustar la presión del gas emitido hasta alcanzar el valor de trabajo deseado, en este caso 5 bar.

A continuación, el CO_2 circula a través de una electroválvula normalmente cerrada, la cual se abre en el momento en que se requiere liberar el gas, permitiendo así el paso del caudal. Seguidamente, el flujo atraviesa una válvula antirretorno neumática colocada en el mismo sentido de circulación, lo que garantiza que el gas solo fluya en una dirección hacia el tanque de lastre. Justo antes de que el CO_2 entre en el tanque para desplazar el agua y ocupar su lugar, reduciendo así el peso y favoreciendo el ascenso del submarino, un sensor de presión ubicado a la entrada del tanque proporciona información en tiempo real sobre la presión interna del sistema en ese instante.

La segunda parte del módulo correspondiente al sistema neumático tiene como función facilitar el llenado parcial del tanque de lastre, permitiendo así que el submarino pueda iniciar su descenso desde la superficie. Este proceso sigue una secuencia específica: inicialmente, el vehículo se encuentra en la superficie a la espera de sumergirse nuevamente. En ese momento, el módulo hidráulico comienza a captar agua del entorno, la cual circula a través del sistema hasta alcanzar el tanque de lastre, reemplazando el volumen previamente ocupado por el CO_2 utilizado durante el ascenso. Para que esto ocurra, el aire remanente es expulsado mediante su circuito correspondiente, atravesando una válvula antirretorno adaptada a dicho sentido de circulación. Con la válvula solenoide adecuada en posición abierta, el aire es liberado al exterior a través del orificio situado en la parte superior del esquema (Figura 3-7).

3.2.4 Sistema hidráulico

El desarrollo del sistema hidráulico (Figura 3-8), tiene un diseño similar al sistema neumático, (Figura 3-7), con el propósito de reducir la complejidad del mismo, ya que el desarrollo de dos sistemas

que no tuvieran relación podría suponer falta de compatibilidad entre ellos además de una mala adaptabilidad a la hora de su incorporación dentro del módulo y programación mediante Arduino.

Es por ello, por lo que esta parte del sistema también cuenta con elementos como válvulas antirretorno, electroválvulas y sensores de presión.

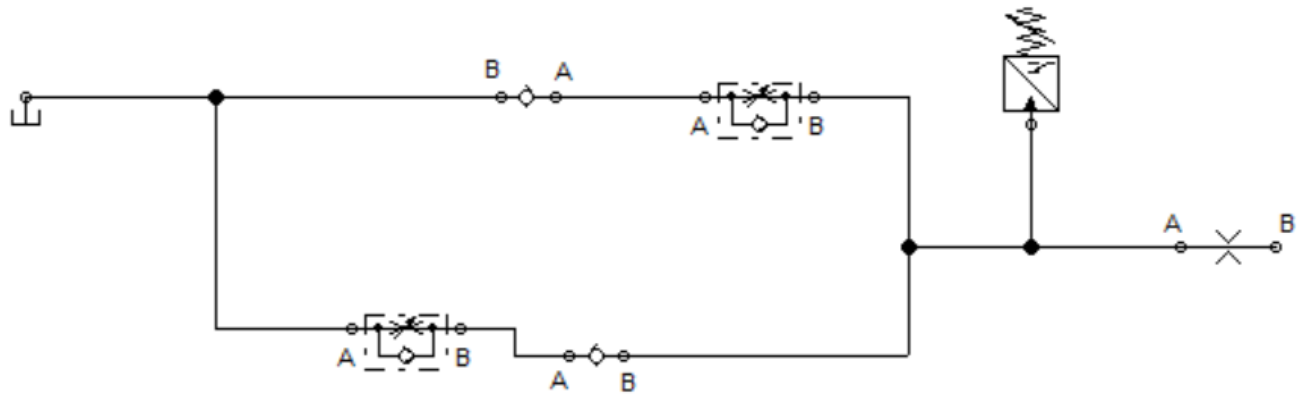


Figura 3-8 Imagen del sistema hidráulico del módulo de lastre (Fuente propia).

Durante el funcionamiento del sistema en una operación de inmersión, un orificio en contacto directo con el medio marino permite la entrada de agua al aprovechar la propia presión del entorno. Esta agua accede al módulo de lastre a través de un tubo principal que dirige su circulación. Una vez dentro del sistema, el primer componente con el que se encuentra el flujo es un sensor de presión hidráulico, encargado de proporcionar datos en tiempo real sobre la presión a la que se introduce el agua. A continuación, el fluido atraviesa una electroválvula que, coordinada mediante el sistema de control basado en Arduino, se encontrará abierta durante el proceso de llenado.

El agua continúa su recorrido a través del conducto hasta llegar a una válvula antirretorno ubicada en el mismo sentido de circulación, con el fin de evitar retrocesos del flujo y pérdidas de presión. Finalmente, el agua accede al tanque de lastre, llenándolo y desplazando el CO₂ que permanecía en su interior tras la maniobra previa de ascenso a superficie.

Mientras que una de las ramas del sistema tiene como finalidad permitir la inmersión del submarino mediante el llenado del tanque de lastre, esta segunda se encarga del proceso inverso: el vaciado del tanque para facilitar el ascenso a superficie. Para ello, el agua contenida en el módulo de lastre es expulsada gracias a la presión ejercida por el CO₂ liberado desde la parte correspondiente del sistema neumático. Bajo esta acción, el agua comienza a circular por el sistema, atravesando en primer lugar una electroválvula hidráulica que se encuentra abierta exclusivamente para permitir este proceso (mientras que la electroválvula empleada durante el llenado permanece cerrada). A continuación, el agua pasa a través de una segunda válvula antirretorno, dispuesta en el mismo sentido de flujo, hasta ser expulsada al exterior. Esta evacuación de agua reduce el peso del submarino, permitiéndole recuperar flotabilidad y ascender a la superficie.

Aunque el análisis y desarrollo de ambos subsistemas del módulo de lastre se ha realizado de forma independiente, es importante destacar que están estrechamente interrelacionados. El correcto funcionamiento del conjunto depende de la coordinación precisa entre ambas ramas del sistema. Para que el tanque de lastre se llene adecuadamente con agua, es imprescindible que el sistema de vaciado de CO₂ opere correctamente, permitiendo la evacuación del gas. De igual manera, ambos procesos (llenado

de agua y vaciado de gas) deben ejecutarse de forma simultánea, con sus respectivas electroválvulas abiertas durante la fase de inmersión.

Del mismo modo, durante el vaciado del tanque de lastre, es fundamental que el CO₂ sea inyectado correctamente mientras se evacúa el agua, lo que también requiere la apertura sincronizada de las válvulas correspondientes. Esta interdependencia funcional garantiza un ciclo eficiente de inmersión y emersión del submarino.

3.3 Propuesta de modelo físico

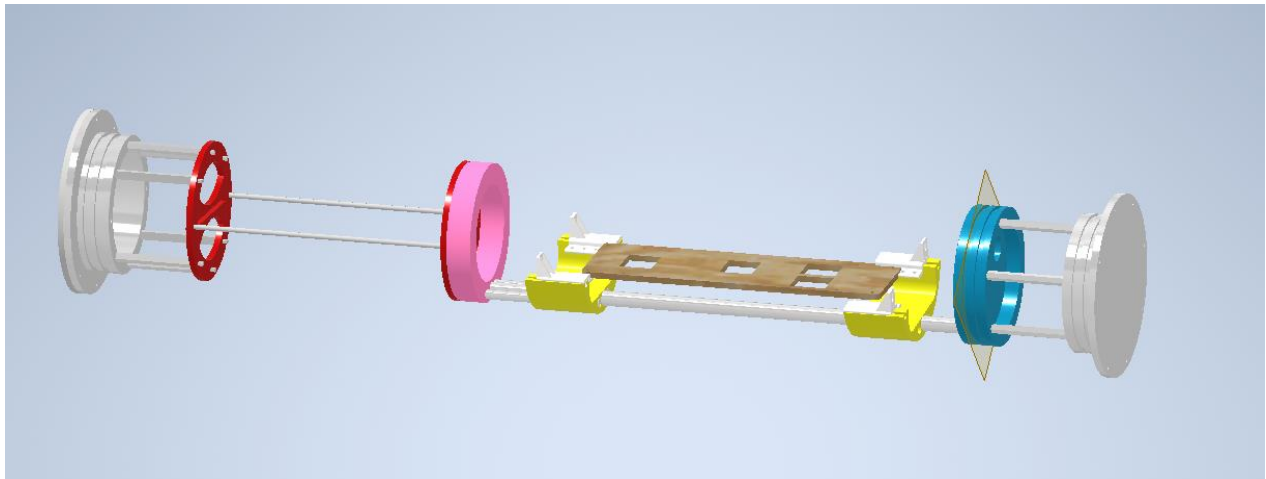


Figura 3-9 Imagen del diseño del módulo de lastre (Fuente propia).

El diseño de este módulo de lastre perteneciente al vehículo submarino no tripulado está pautado por unas características restrictivas para el mismo en cuanto al tamaño de sus componentes y espacio disponible para su distribución, ya que este debe estar contenido en un continente de forma tubular de metacrilato de 120 mm de diámetro exterior y un correspondiente diámetro interior de 108 mm. Aunque este dron con las características mencionadas y los distintos módulos previamente diseñados podría navegar a profundidades de 200 metros, en el caso de este proyecto al tratarse de un prototipo su diseño está pensado para profundidades en torno a los 20 metros.

El módulo de lastre diseñado se puede dividir en tres bloques fundamentales, los cuales son:

- **Tanque de lastre:** diseñado sobre el módulo con un sello de color azul y la pared de sellado de aluminio oscuro del módulo.
- **Soporte de sistemas:** compuesto por la placa de soporte realizada sobre madera y la estructura compuesta por las piezas amarillas y fijadores blancos
- **Soporte del sistema electrónico:** espacio destinado a la integración total del sistema eléctrico delimitado por las estructuras rojas y rosa.
- **Conector sistema - botella de CO₂:** estructura de bronce compuesta de tres piezas destinada a permitir el uso de la botella de CO₂ en el sistema.

Todos y cada uno de estos elementos son claves para el correcto funcionamiento del sistema. Además, este módulo de lastre ha sido diseñado a su vez por fases donde a cada uno de sus componentes se le ha tratado de dar la máxima independencia posible con respecto del otro, esto es debido a un aumento de la seguridad e integridad del sistema en caso de avería o catástrofe sobre el propio vehículo, de tal forma que los daños que se produzcan sobre el módulo no sean de carácter global produciendo un siniestro total al vehículo no tripulado.

3.3.1 Tanque de lastre

El tanque de lastre diseñado cuenta con dos componentes principales, uno de ellos situado a la derecha de color azul, este elemento supone una de las paredes del tanque de lastre, en su composición destacan dos agujeros realizados correspondientes a los 6 y 8 mm con los que operan los pasamamparos de las partes neumática y eléctrica respectivamente.

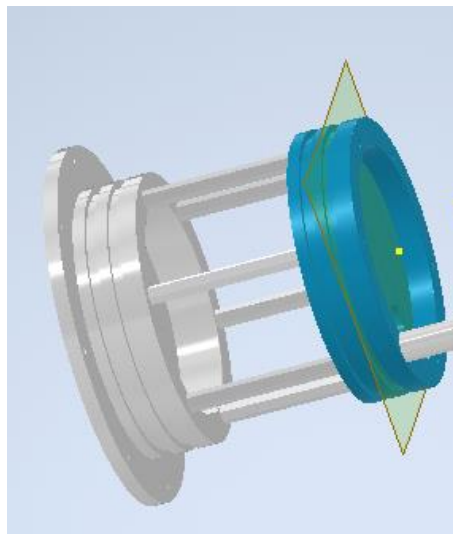


Figura 3-10 Imagen del tanque de lastre (Fuente propia).

Este tanque cuenta con una capacidad volumétrica de 1,5 litros para sus operaciones de inmersión y emersión. Además de estas dos perforaciones centrales cuenta con otras 7 dedicadas a otras funciones, de las cuales 6 serán de menor tamaño 3,8 milímetros empuñadas como elementos de unión entre esta pared del tanque de lastre y uno de los sellos del módulo (que se pueden observar de color aluminio oscuro (Figura 3-10)). Por otra parte, disponemos de una perforación central de 12,4 mm en la parte inferior de la pared del tanque de lastre la cual va a ser destinada a la unión del tanque al módulo de soporte del sistema y a su vez impedirá el desplazamiento del sistema colindante en los movimientos tanto del vehículo como del agua del tanque.

3.3.2 Soporte de sistema

Esta estructura perteneciente al módulo de lastre es otro de los tres elementos principales del sistema, ya que en él se encuentran integrados las 4 electroválvulas que componen el sistema y uno de los sensores de presión, concretamente el de la parte neumática.

Este soporte del sistema está constituido de manera simétrica por 3 únicas piezas que se repiten a ambos lados del eje central, todas ellas mostradas de distintos colores:

1. **Placa base de soporte:** este tipo de plataforma se encuentra diseñada por madera, obtenida a través de un proceso de cortado laser (Figura 4-23), las dimensiones del soporte permiten alojar en su interior la totalidad de las electroválvulas del sistema, optimizando así el espacio disponible. Además, las perforaciones han sido diseñadas con la forma específica de cada

componente, lo que posibilita una separación funcional entre la zona destinada a la tubería y la que concentra los elementos eléctricos. Esta disposición estructural facilita las labores de inspección, mantenimiento o reparación, permitiendo acceder de forma ordenada e independiente a cada subsistema en caso de avería.

2. **Soportes de plataforma:** diseñados a partir de PLA blanco (Tabla 4-1), Estos soportes se integran directamente con las bases del diseño sin requerir piezas adicionales, lo que facilita el montaje y reduce la complejidad estructural. Su geometría incluye una extrusión destinada a la fijación de la placa base, la cual incorpora múltiples orificios roscados que ofrecen una mayor flexibilidad y adaptabilidad durante el proceso de ensamblaje. Gracias a esta disposición, es posible ajustar la posición de los componentes y ampliar el espacio disponible para el montaje, alcanzando una extensión total de hasta 10 centímetros.
3. **Base del soporte:** las bases han sido diseñadas a partir de PLA amarillo (Tabla 4-1), con una geometría circular con el fin de adaptarse de forma modular al diseño global del vehículo submarino. Cada una de ellas presenta un arco de 113 milímetros, lo que permite su correcta integración en el conjunto estructural, garantizando un cierre estanco que previene posibles filtraciones de agua. En la parte inferior del diseño se incluyen tres perforaciones, cuyo uso varía en función de la base concreta que se emplee. En el caso de la base derecha, esta se encuentra unida a la pared del tanque mediante una única fijación central, la cual actúa como punto de anclaje que impide el desplazamiento de dicha pared y proporciona estabilidad al conjunto. Por su parte, la base izquierda utiliza las tres perforaciones mencionadas para asegurar el sistema de soporte al extremo del módulo electrónico, reduciendo así los grados de libertad del sistema y garantizando una fijación firme y estable del soporte estructural.

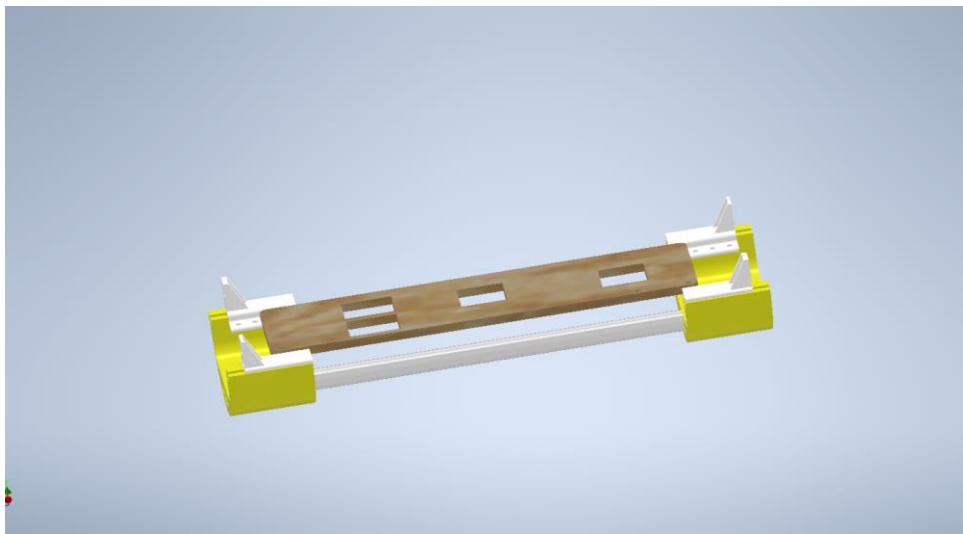


Figura 3-11 Imagen del soporte de válvulas del módulo de lastre (Fuente propia).

3.3.3 Soporte del sistema electrónico

Esta parte del sistema ha sido diseñada con el propósito de alojar a todos y cada uno de los elementos eléctricos a excepción de las electroválvulas (situadas en el soporte del sistema), es decir el cableado, módulo relé, placa base de Arduino, protoboard y los cables que conectan tanto arduino como electroválvulas a las fuentes de alimentación.

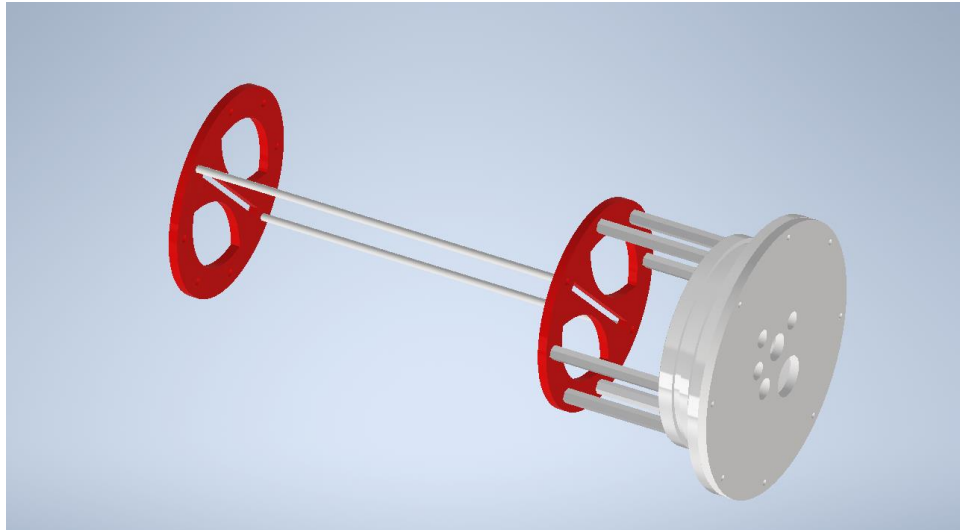


Figura 3-12 Imagen del módulo eléctrico dentro del sistema de lastre (Fuente propia).

El diseño está basado en 4 elementos principales, describiendo este módulo de izquierda a derecha nos encontramos:

1. **Placa de separación:** fabricadas en material PLA de color rojo mediante impresión 3D, estas piezas presentan dos aperturas principales dispuestas de forma completamente simétrica a ambos lados de su eje central. Esta configuración permite el paso ordenado de todas las conexiones por cable necesarias para el funcionamiento del sistema. Entre ambas placas de separación se ha habilitado un espacio específico destinado a la ubicación de la protoboard utilizada para el montaje electrónico, así como del módulo de relés y la placa Arduino, integrando así de forma compacta y funcional los elementos clave del sistema de control.
2. **Separadores:** fabricados en aluminio anodizado de color oscuro, estos separadores hexagonales cumplen una doble función estructural. Por un lado, permiten fijar con firmeza las placas de separación rojas previamente descritas, evitando cualquier tipo de desplazamiento durante el funcionamiento del sistema. Por otro, actúan como elemento de unión con la tapa de sellado de aluminio, la cual ha sido diseñada con las mismas características geométricas y funcionales que las placas mencionadas, asegurando así la continuidad estructural y el cierre estanco del conjunto.
3. **Tapa de sellado:** la tapa de aluminio anodizado oscuro ha sido diseñada con las mismas características estructurales que las piezas previamente descritas, con la salvedad de que su zona central no es opaca, sino que presenta una abertura. Esta apertura central ha sido incorporada intencionadamente para permitir el paso libre del conjunto de tubos y cables que componen el sistema, facilitando así su salida hacia el exterior del módulo sin comprometer la integridad estructural del conjunto.
4. **Tapa de conexiones:** esta tapa ha sido fabricada mediante un proceso de corte láser, a partir de un diseño previo realizado en AutoCAD. Está compuesta por metacrilato, un material seleccionado por su resistencia mecánica y su capacidad para soportar la acción abrasiva del agua de mar. Su principal función es actuar como pared estructural del módulo de lastre, integrándose en el conjunto como parte del sistema de contención. La tapa dispone de cinco orificios distribuidos estratégicamente, cada uno de los cuales cumple una función específica dentro del sistema:
 - Permitir la salida del circuito neumático hacia el exterior del sistema.

- Permitir la salida del circuito hidráulico, facilitando el flujo de agua
- Actuar como canal de salida para los cables de alimentación eléctrica.
- Actuar como canal de salida para los cables de comunicación del sistema de control.

3.3.4 Conector sistema - botella de CO₂

Uno de los principios fundamentales para el funcionamiento de este módulo, y sobre el cual se basa su concepción, es el uso de una botella de aire comprimido que permita expulsar el agua contenida en el sistema de lastre, aligerando así el peso del submarino para facilitar su ascenso a superficie. Por este motivo, el diseño de una pieza que posibilitara la conexión segura y eficiente de dicha botella con el sistema neumático ha sido un aspecto clave en el desarrollo del proyecto.

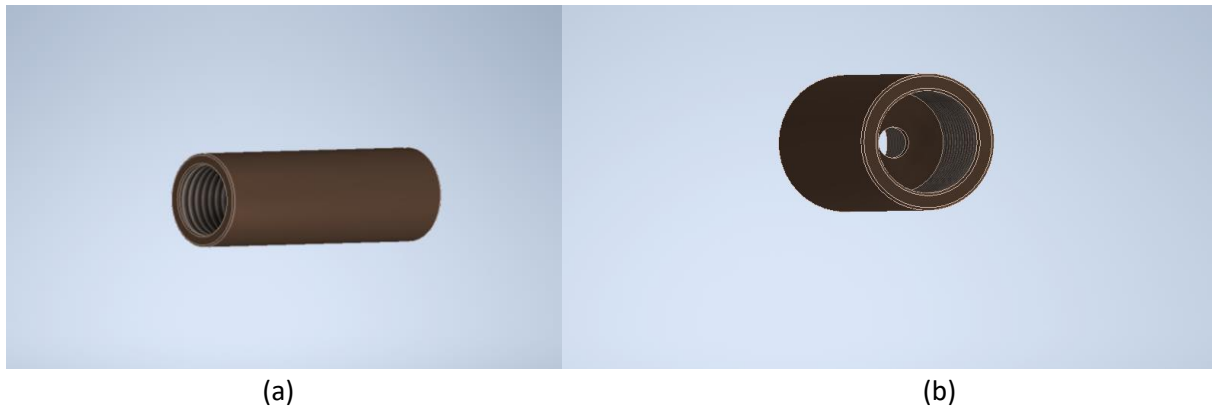


Figura 3-13 y Figura 3-14 Imagen de conector de botella de CO₂ (Fuente propia).

Esta pieza ha sido fabricada en bronce y presenta, en términos generales, una forma cilíndrica con dos aperturas principales. La primera de ellas permite la conexión directa de la botella al circuito neumático del sistema. La segunda apertura está destinada a la integración de una válvula de seguridad, cuya función es garantizar una descarga controlada en caso de sobrepresión (Figura 3-13 y Figura 3-13).

Dado que el CO₂ contenido en las botellas se encuentra a presiones muy elevadas (por ejemplo, 57,3 bar en este caso), una liberación no controlada podría generar un chorro de gas potencialmente peligroso. La válvula de seguridad actúa como mecanismo de protección, permitiendo liberar el exceso de presión de forma controlada y evitando daños tanto en el sistema como en su entorno.

3.4 Diseño del modelo digital

Para la propuesta del modelo digital se utilizará como herramienta el uso de redes de Petri. Las Redes de Petri constituyen una herramienta gráfica y matemática ampliamente utilizada para la representación, análisis y modelado de sistemas dinámicos con comportamiento secuencial, concurrente o asincrónico. Su estructura se basa en la interacción entre dos tipos de componentes fundamentales: plazas, que representan estados o condiciones, y transiciones, que modelan eventos o acciones. Estos elementos se interconectan mediante arcos dirigidos y son acompañados por tokens (fichas), que permiten simular el flujo o evolución del sistema a lo largo del tiempo.

Esta herramienta resulta especialmente útil en el ámbito de la ingeniería y la automatización, ya que permite visualizar claramente la lógica del sistema, detectar posibles conflictos, verificar condiciones de seguridad y validar el comportamiento ante distintos escenarios. Las Redes de Petri son aplicadas

habitualmente en el diseño de circuitos de control, procesos industriales, protocolos de comunicación, y también en la programación de sistemas de código tipo Arduino.

En el contexto del presente proyecto, la Red de Petri se emplea como una herramienta de apoyo para representar y justificar el comportamiento lógico del sistema de lastre. Su utilización permite traducir de forma gráfica y estructurada el código implementado en Arduino, facilitando así la comprensión de la secuencia de acciones involucradas en las fases de inmersión y emersión del submarino. De esta manera, se aporta una capa adicional de validación conceptual y funcional que refuerza la solidez del diseño propuesto.

3.4.1 Propuesta de sistema

En este apartado se desarrolla la propuesta del sistema eléctrico diseñado para garantizar una actuación eficiente del módulo de lastre, manteniendo al mismo tiempo una estructura lo más sencilla posible. El objetivo es facilitar la integración entre la programación de los sistemas neumático e hidráulico, permitiendo una coordinación precisa entre ambos. Para representar la lógica de funcionamiento del sistema de forma estructurada, se empleará una Red de Petri, tal como se ha introducido en el apartado anterior.

Para este diseño, lo primero que se ha realizado es la identificación de una serie de estados y transiciones claras sobre las que se basará el desarrollo de nuestro sistema. Los estados representan las distintas condiciones en las que puede encontrarse el sistema durante su funcionamiento, mientras que las transiciones definen los eventos o acciones que permiten el paso de un estado a otro, estructurando así la lógica de control del proceso.

Por lo que, tras analizar las necesidades del sistema diseñado, disponemos de 12 estados teniendo en cuenta que el sistema parte de una inactividad inicial y 11 transiciones, este número es debido a que el sistema parte de un estado de pausa (estado *STOP*) en el que no ha recibido ninguna orden.

Numeral	Estados (P)	Transiciones (T)
0	Sistema en reposo	-
1	Sistema listo para inmersión	Comando iniciar inmersión recibido
2	Entrada de agua activa	Activación de válvula de entrada de agua
3	Tanque lleno de agua	Sensor detecta el tanque lleno
4	Fin ciclo IN	Comando de emersión recibido
5	Retorno a STOP	Activación de válvula de entrada de aire
6	Sistema preparado para emersión	Inicio OUT

7	Entrada de CO ₂ y salida de H ₂ O	Activar entrada de CO ₂ y salida de H ₂ O
8	Tanque vacío de agua	Tanque vacío detectado
9	Fin de ciclo OUT	Fin de vaciado
10	Retorno a STOP	Regresar a stop
11	Estado stop	Permanecer en stop

Tabla 3-3 Tabla de muestra de estados y transiciones dentro del sistema (Fuente propia).

Con todo ello se elabora la siguiente propuesta de sistema:

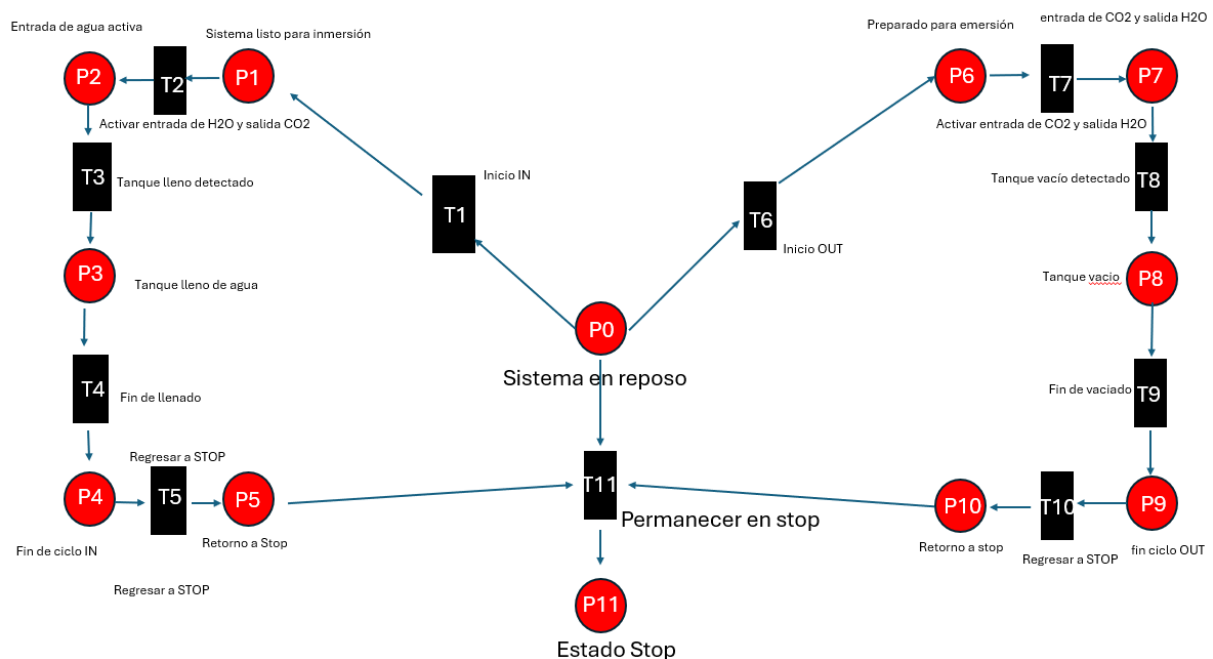


Figura 3-15 Imagen de representación de la red de Petri del sistema (Fuente propia).

La Red de Petri presentada representa de forma estructurada y visual el funcionamiento lógico del sistema de lastre automatizado del submarino, modelado a partir del código implementado en Arduino. En ella se reflejan tres posibles rutas operativas que parten desde un estado inicial común (P0 – Sistema en reposo): un ciclo de inmersión (in), un ciclo de emersión (out) y una fase de espera o estabilidad (stop).

Cada estado (plaza) está representado por un círculo rojo, mientras que cada acción o evento que produce un cambio de estado está representado por un rectángulo negro (transición). Las flechas indican el flujo secuencial de operaciones y aseguran que el sistema no pueda ejecutar simultáneamente más de un ciclo activo.

El sistema de lastre del submarino opera a través de un ciclo automatizado basado en comandos de control, que activa distintas fases de funcionamiento. Una de las ramas principales del sistema es la correspondiente a la inmersión, que se activa mediante la recepción del comando “in”. Esta orden indica que se desea aumentar la densidad del submarino para que comience su descenso. Para lograrlo, se

requiere que el tanque de lastre, que normalmente está lleno de CO₂ comprimido en superficie, sea sustituido por agua de mar.

Al recibir el comando, el sistema pasa del estado de reposo a la fase de preparación para inmersión, en la cual se abren dos válvulas normalmente cerradas de forma simultánea: una permite la entrada de agua desde el medio marino y la otra habilita la salida del CO₂ residual presente en el tanque. Este intercambio de fluidos es clave para el proceso, ya que el tanque de lastre siempre se encuentra ocupado por un fluido: CO₂ en la superficie y agua durante la inmersión.

Una vez que el sensor del sistema detecta que el tanque está completamente lleno de agua, se cierran las válvulas automáticamente, finalizando así el ciclo de inmersión. Esta condición deja al submarino en una situación estable y listo para continuar su operación.

En paralelo a estas fases, el sistema contempla la existencia de un estado de reposo o “stop”, al cual se regresa una vez finaliza cada ciclo, o en el que permanece en ausencia de nuevas órdenes. Este estado garantiza la seguridad y estabilidad del sistema, ya que ninguna válvula se encuentra abierta y el sistema queda en espera, sin ejecutar ningún tipo de acción. Este punto de reposo actúa como nodo común tanto para la entrada al ciclo de inmersión como para el de emersión, permitiendo una transición ordenada y segura entre fases.

Desde el punto de vista técnico, es importante destacar que todas las válvulas del sistema son del tipo normalmente cerrado, lo que significa que permanecen selladas por defecto, y solo se abren bajo condiciones controladas mediante señales digitales desde el microcontrolador. Esto garantiza que, en caso de fallo eléctrico o pérdida de señal, no se produzcan ni entradas ni salidas de fluido indeseadas.

Además, el sistema ha sido diseñado bajo la premisa de que el tanque de lastre siempre debe contener un fluido: nunca está vacío. Este principio asegura que el submarino mantenga su equilibrio de flotabilidad en todo momento, y que cualquier transición entre estados esté mediada por un desplazamiento de fluido claramente controlado: agua para descender y CO₂ para ascender.

4 MATERIALES Y MÉTODOS.

Una vez definido el diseño conceptual del sistema de lastre, se procede a su materialización mediante la selección e integración de los distintos componentes físicos que lo conforman. Esta fase tiene como objetivo trasladar el modelo teórico a un entorno real, permitiendo su verificación funcional y análisis experimental. Para ello, se ha llevado a cabo el montaje del sistema en condiciones controladas, utilizando materiales adecuados para simular el comportamiento del módulo de lastre en un entorno subacuático.

Durante esta etapa se describen en detalle los elementos utilizados, tanto electrónicos como neumáticos e hidráulicos, así como el proceso de ensamblaje, las herramientas empleadas y la lógica seguida para su disposición. Esta sección también abarca la arquitectura de soporte del sistema de control y demás elementos necesarios para el funcionamiento del conjunto.

4.1 Sistema neumático

A continuación, se detalla el sistema neumático expresado anteriormente (Figura 3-7), sus componentes esenciales para su funcionamiento y características principales de cada uno de ellos para la comprensión de su funcionamiento y empleo correcto en el sistema.

4.1.1 Componentes del sistema

Los componentes empleados en el diseño del sistema son los siguientes:

- **Botella de aire comprimido**[51]



Figura 4-1 Imagen de botella de aire comprimido (Fuente propia).

Especificaciones [52]:

Condición: 100% nuevo.

Modelo: Zefal.

Material: Acero.

Color: oro.

Peso: 65 gramos.

Capacidad: 25 gramos CO₂.

Combustible: CO₂.

Tamaño de la rosca principal: 27.5'' x 2.4''.

- **Válvula solenoide normalmente cerrada**[53].



Figura 4-2 Imagen de electroválvula del sistema neumático (Fuente propia).

Especificaciones:

Condición: 100% nuevo.

Modelo: Heschen.

Material: Aluminio

Estilo: electroválvula neumática.

Color: plateado.

Voltaje de bobina: 24 V CC.

Tamaño del componente (largo x ancho x alto): 9 x 6,6 x 2,5 centímetros.

Alimentación: DC.

Presión máxima: 78,45 Atmósferas.

- **Regulador de presiones**

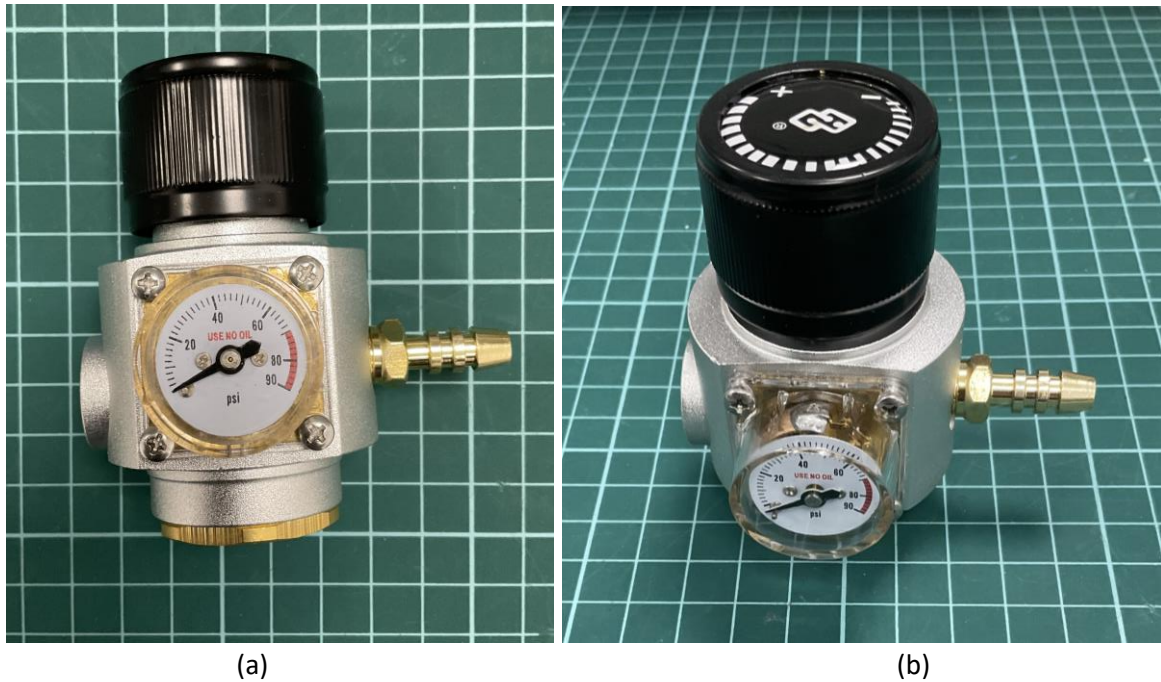


Figura 4-3 y Figura 4-4, Imágenes de regulador de presiones desde distintas perspectivas (Fuente propia).

Especificaciones:

Condición: 100% nuevo.

Modelo: Heschen.

Material: Aluminio.

Estilo: electroválvula neumática.

Color: plateado.

Voltaje de bobina: 24 VCC.

Tamaño del componente (largo x ancho x alto): 9 x 6,6 x 2,5 centímetros.

Alimentación: DC.

Presión máxima: 78,45 Atmósferas.

- **Válvula antirretorno** [54].



Figura 4-5, Imagen de válvula antirretorno empleada para cada una de las electroválvulas (Fuente propia).

Especificaciones:

Condición: 100% nuevo.

Modelo: Bwintech.

Material: Aluminio.

Estilo: válvula de retención unidireccional neumática recta.

Color: plateado y negro.

Tamaño del componente (diámetro): 6 mm.

Alimentación: flujo de aire a través de un tubo.

Presión de trabajo: 0 – 8 bar.

Temperatura de trabajo: 0 – 60 °C.

- **Sensor de aire a presión [55].**



Figura 4-6 Imagen de sensor de aire a presión (Fuente propia).

Especificaciones:

Condición: 100% nuevo.

Modelo: Akozon.

Material: Acero inoxidable.

Estilo: sensor de presión para CO₂.

Color: plateado y negro.

Precisión en la medida: +/- 2% FS.

Presión de trabajo: 0 – 500 psi.

Tensión de suministro: 5 Voltios (CC).

- **Tubo negro [56].**



Figura 4-7 Imagen de tubo continente del aire a presión (Fuente propia).

Especificaciones:

Condición: 100% nuevo.

Material: Poliuretano.

Estilo: tubo de conducción de aire.

Color: negro.

Tamaño del componente (diámetro): 6 mm.

Temperatura de trabajo: 0 - 60 °C.

Presión de trabajo: 10kgf/cm².

- **Pasamamparos [57]**



Figura 4-8 Imagen del pasamamparos en su posición de uso (Fuente propia).

Especificaciones:

Condición: 100% nuevo.

Material: Latón.

Estilo: conducto que atraviesa una de las paredes del tanque de lastre para la circulación del aire a presión o para llevar el aire al exterior o para expulsar el aire procedente de la botella al tanque de lastre.

Color: oro.

Tamaño del componente (diámetro): 6 mm.

Temperatura de trabajo: 0 – 80 °C.

Presión de trabajo: 1,5 Mpa.

- **Conector de botella de CO₂**



Figura 4-9 Imagen de conector de botella de CO₂ (Fuente propia).

Especificaciones:

Métrica de rosca de la válvula de seguridad: M18× 1,5.

Métrica de rosca de conexión a la botella de CO₂: M16× 1,5.

4.2 Sistema hidráulico

A continuación, se detalla el sistema hidráulico expresado anteriormente (Figura 3-8), sus componentes esenciales para su funcionamiento y características principales de cada uno de ellos para la comprensión de su funcionamiento y empleo correcto en el sistema.

4.2.1 Componentes

Los componentes de los que está compuesto la parte hidráulica del sistema del módulo de lastre son:

- **Válvula solenoide normalmente cerrada [58].**



Figura 4-10 Imagen de válvula solenoide del sistema hidráulico (Fuente propia).

Especificaciones:

Condición: 100% nuevo.

Modelo: Yanmis.

Material: Plástico y metal.

Estilo: válvula electromagnética.

Color: negro.

Voltaje de bobina: 12 V CC.

Tamaño del componente (largo x ancho x alto): 10 x 10 x 10 mm.

Alimentación: DC.

Presión de trabajo: 0,002 – 0,8 Mpa.

Temperatura de trabajo: 0 – 40 °C.

- **Válvulas antirretorno [59].**



Figura 4-11 Imagen de válvula antirretorno del sistema hidráulico (Fuente propia).

Especificaciones:

Condición: 100% nuevo.

Modelo: SRJQXH.

Material: Cobre.

Estilo: válvula de retención unidireccional hidráulica recta roscada.

Color: plateado.

Tamaño del componente (diámetro): 8 milímetros.

Alimentación: flujo de agua salada a través de un tubo.

Presión de trabajo: 0 – 8 bar.

Temperatura de trabajo: 0 – 60 °C.

- **Sensor de presión hidráulico [60].**



Figura 4-12 Imagen de sensor hidráulico de presión conectado a protoboard (Fuente propia)

Especificaciones:

Condición: 100% nuevo.
Modelo: Akozon.
Material: Acero inoxidable.
Estilo: sensor de presión para H_2O .
Color: plateado y negro
Precisión en la medida: +/- 2% FS.
Presión de trabajo: 0 – 500 psi.
Tensión de suministro: 5 Voltios (CC).

- **Tubo de circulación** [61].



Figura 4-13 Imagen de tubo continente del agua de circulación del sistema hidráulico

Especificaciones:

Condición: 100% nuevo.
Modelo: manguera de fontanería.
Material: PVC.
Estilo: tubo de conducción de agua marina.
Color: transparente.
Tamaño del componente (diámetro): 1/2".
Temperatura de trabajo: 0 – 22 ° C.
Presión de trabajo: 80 Psi.

- **Pasamamparos** [62], [63].

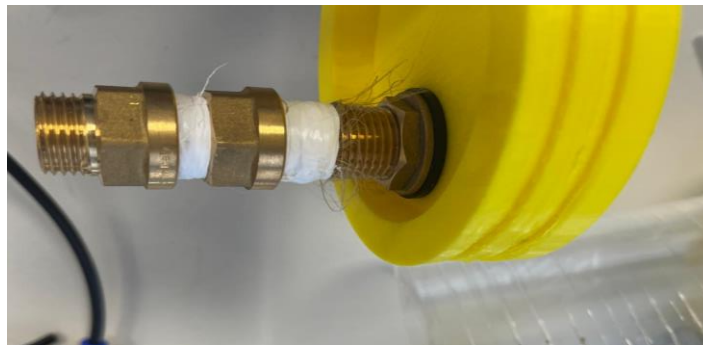


Figura 4-14 Imagen del pasamamparos hidráulico a través de una de las paredes del tanque de lastre (Fuente propia)

Especificaciones:

Condición: 100% nuevo.

Material: Latón.

Estilo: conducto que atraviesa una de las paredes del tanque de lastre para la circulación del agua a presión para llevar el agua al exterior o recircular el agua del mar hacia el tanque de lastre.

Color: oro.

Tamaño del componente (diámetro): ½”.

Temperatura de trabajo: 0 -80 °C.

Presión de trabajo: 1,5 Mpa.

4.3 Componentes electrónicos del sistema de módulo de lastre

Uno de los pilares fundamentales en los que se basa el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado es la creación de un código computacional que permita controlar los sensores empleados en el montaje del sistema para un correcto llenado, vaciado y funcionamiento intermedio del sistema.

Tras un análisis de las posibilidades que ofrece el material con el que se ha decidido elaborar el montaje del sistema del módulo de lastre, y los diferentes tipos de plataforma de programación, la elaboración del código se realizará mediante el software Arduino complementándose con un módulo de 4 relés para facilitar la programación de los distintos sensores y válvulas.

4.3.1 Sistema Arduino

Arduino es una plataforma de hardware y software de código abierto diseñada para facilitar la creación de proyectos de electrónica, automatización y prototipado sin necesidad de conocimientos avanzados acerca de lenguajes de programación [64].

Su componente principal es una placa con un microcontrolador, un pequeño procesador que actúa como el "cerebro" del sistema, ejecutando instrucciones programadas por el usuario para interactuar con

el entorno. Estas placas cuentan con pines digitales y analógicos que permiten conectar sensores, motores, luces y otros dispositivos. Los pines digitales funcionan con señales de encendido y apagado, útiles para tareas como prender un LED o leer el estado de un botón, mientras que los pines analógicos pueden medir valores intermedios, como la temperatura o la luz ambiental. Algunos pines digitales también admiten PWM, una técnica que simula señales analógicas para regular la intensidad de una luz o la velocidad de un motor.

La programación de Arduino se realiza en un lenguaje basado en C++, simplificado para facilitar su aprendizaje. Para escribir y cargar el código en la placa se utiliza un entorno de desarrollo (IDE) gratuito y fácil de usar. La alimentación es flexible: puede conectarse mediante un cable USB a un ordenador o utilizar una batería externa de entre 7 y 12V. Además, cuenta con un regulador de voltaje integrado para evitar daños en los componentes [65].

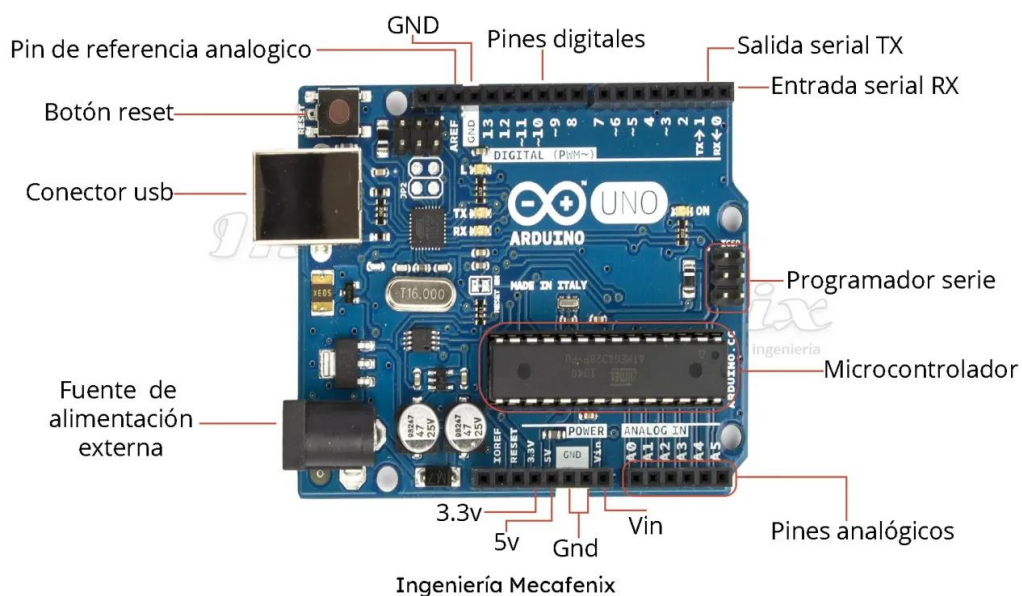


Figura 4-15 Imagen de placa Arduino UNO[65].

Una de las grandes ventajas de Arduino es su modularidad. Existen módulos llamados shields que se conectan directamente a la placa para ampliar sus funciones, como añadir conectividad WiFi, controlar motores o integrar pantallas. También es compatible con una gran variedad de sensores y actuadores (como los sensores de presión neumática e hidráulica de nuestro sistema).

Además, este software globalmente conocido, aporta una comunidad la cual proporciona soporte, bibliotecas de código prescrito, videos y numerosos ejemplos que facilitan el aprendizaje y aceleran el desarrollo de proyectos [66].

Aunque Arduino no tiene la capacidad de procesamiento de computadoras de sistemas industriales como Raspberry Pi ni la robustez de un sistema industrial, destaca por su simplicidad, bajo costo y versatilidad. Se utiliza principalmente en proyectos de bajo nivel, domótica (automatización del hogar) o robótica básica. Sus limitaciones, como la memoria reducida o la falta de soporte para redes complejas, se compensan con su facilidad de uso, permitiendo traducir código en acciones físicas de manera accesible.

Por otro lado, para que Arduino funcione, es necesario decirle qué hacer, y esto se logra escribiendo instrucciones en un programa especial llamado "Arduino IDE" (Figura 4-16). Este programa se instala

en la computadora y permite escribir las órdenes que la placa seguirá. Estas órdenes se escriben en un lenguaje donde primero se indican las cosas que se van a usar y luego se define qué debe hacer el sistema paso a paso. Una vez que el código está listo, se envía a la placa mediante el cable USB anteriormente mencionado, y el Arduino empieza a ejecutar las instrucciones automáticamente [67].

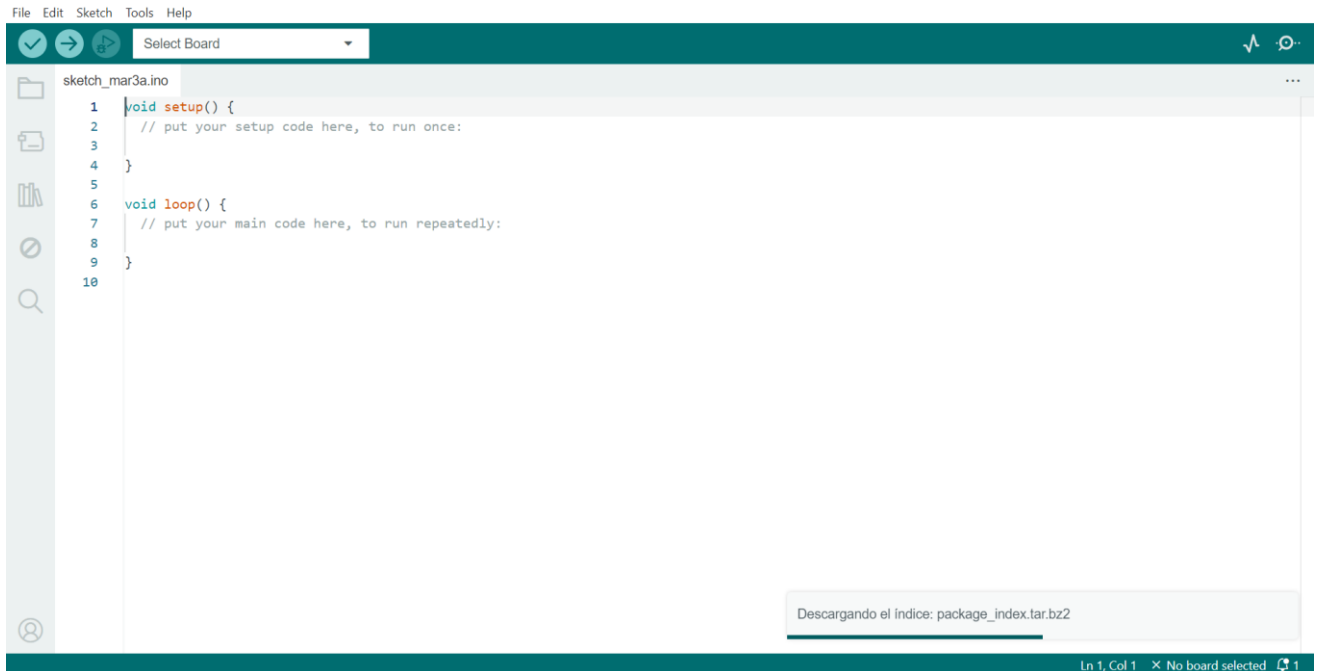


Figura 4-16 Imagen de la pantalla principal de Arduino IDE (Fuente propia).

Este programa es de fácil comprensión y adaptable a todas las plataformas como IOS, Android o Windows como es en nuestro caso. Mostrando un fácil acceso a librerías y otros códigos anteriormente programados para su uso.

4.3.2 Componentes electrónicos

- **Arduino UNO**



Figura 4-17 Imagen de placa Arduino UNO (Fuente propia).

Especificaciones:

Voltaje de operación: opera a 5V, el cual es el nivel lógico de los pines.

Voltaje de entrada: 7V- 12V (a través del jack de alimentación).

Entradas y salidas: 14 pines digitales (0-13), de los cuales 6 pueden generar PWM (señales de modulación de ancho de pulso). Además de 6 entradas analógicas.

Alimentación: A través del puerto USB tipo B o mediante un adaptador de 7-12V en el jack de alimentación.

Memoria: Flash de 32 KB (almacena el código del programa), SRAM de 2 KB (memoria de trabajo del microcontrolador), EEPROM de 1 KB (memoria no volátil para almacenar datos permanentes).

Microcontrolador: ATmega328P (chip principal de la placa).

- **Módulo de soporte de la alimentación de batería**

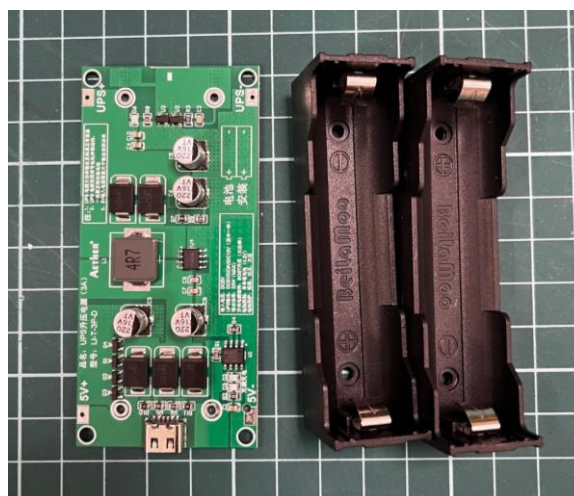


Figura 4-18 Imagen del soporte de alimentación de baterías del sistema (Fuente propia).

Especificaciones:

Voltaje de entrada y de salida: cuenta con una entrada y salida de 5V regulada para alimentar dispositivos electrónicos.

Capacidad de carga: soporta baterías de litio 18650.

Conectores: cuenta con un puerto Micro-USB para la entrada de carga y terminales USB de salida para facilitar la conexión de dispositivos.

- **Módulo de relés**

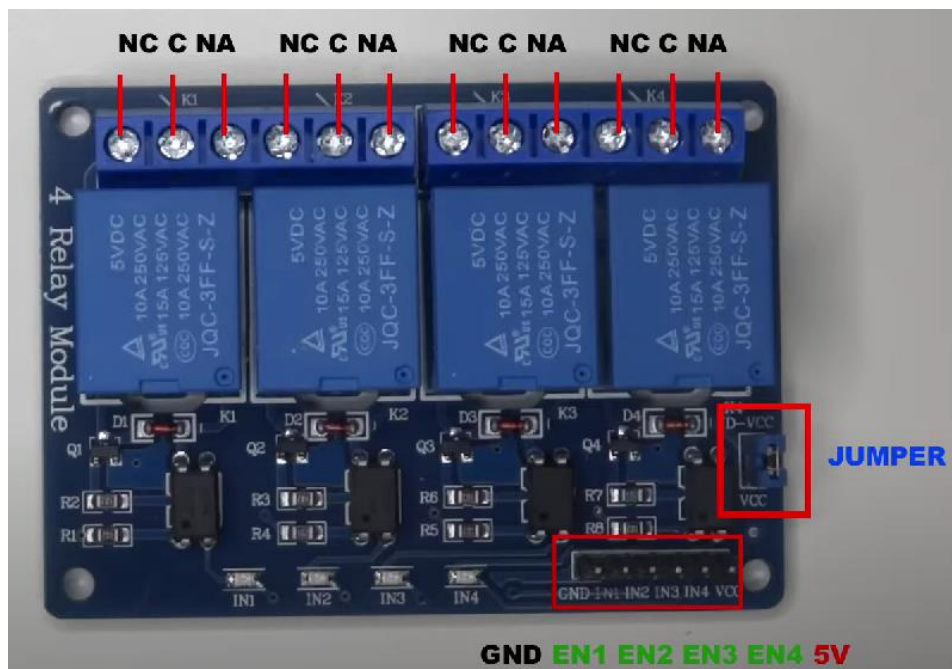


Figura 4-19 Imagen de módulo de 4 relés de 5 VC (Fuente propia).

Especificaciones:

Voltaje de operación: 5V DC.

Número de relés: 4 canales independientes.

Tipo: Relés electromecánicos modelo JQC-3FF-S-Z.

Capacidad de carga: - AC: Hasta 10A @ 250V AC. // - DC: Hasta 10A @ 30V DC.

Tomas de alimentación: tierra (GND), 5V de alimentación (5V) y alimentación de los relés con opción de jumper (JD-VCC).

Conexión de carga: cada relé tiene 3 terminales (Normalmente cerrada/común/normalmente abierta).

4.3.3 Propuesta de diseño de los elementos electrónicos

El desarrollo que va a tener el diseño de los medios electrónicos se basará en el uso de la placa Arduino UNO, los módulos de relés y las válvulas y sensores ya explicados anteriormente.

Para el control de las válvulas, al ser estas de un voltaje de trabajo de 12V y Arduino a 5V, estas estarán alimentadas por una fuente externa de energía y será rebajada su tensión eléctrica a través de la entrada en el módulo relé, este como ya ha sido explicado tiene 4 puertos relé, idóneo para el desarrollo de nuestro sistema, ya que cada una de las válvulas ira conectada a uno de estos puertos.

Una vez se tenga este diseño inicial se incorporarán los sensores que, mezclándolos en el sistema e integrando un código de manejo que condicione las medidas de estos sensores al código ya existente destinado a abrir o cerrar las válvulas, nos permita obtener el trasiego de agua y de aire bajo las condiciones requeridas.

4.4 Soporte del sistema

4.4.1 Software del diseño

Para la realización del diseño de este módulo de lastre para un submarino no tripulado, son necesarias herramientas de diseño con una gran precisión y que nos aporten un gran número de herramientas de fácil uso, además de compatibilidad con otras plataformas, es por ello por lo que para poder realizar este proyecto se ha utilizado principalmente, plataformas digitales como son el software Inventor y AutoCad. A pesar de que ambos softwares son para diseño y modelaje de las piezas empleadas en la creación de este módulo, Inventor ha desempeñado un papel más determinante, ya que ofrece la posibilidad del manejo de piezas en un campo tridimensional, cosa que AutoCad solo puede realizar de manera 2D. Esto ha supuesto que la realización de las piezas más complejas, y, la mayor parte de estas, ya que en su mayor parte superan el campo 2D.

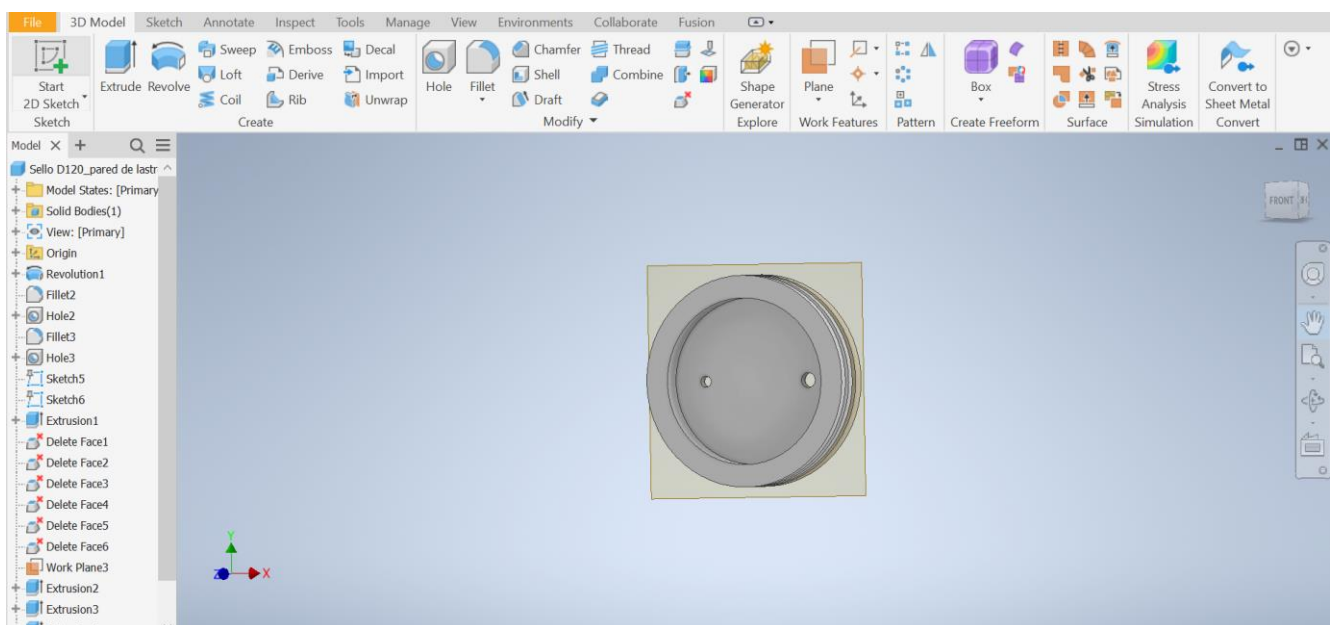


Figura 4-20 Imagen de un diseño de Autodesk Inventor (Fuente propia).

El software Autodesk Inventor permite crear diseños en 3D de objetos y máquinas, ayudando a pasar de una idea a un producto real. Este software de CAD (*Computer-Aided Design*) es muy útil para

ingenieros y diseñadores, ya que te permite dibujar piezas y unirlos en conjuntos o ensamblajes (varios objetos que se conectan para formar una máquina). Además, Inventor te ayuda a generar planos detallados y listas de materiales (*BOM, Bill Of Materials*) para saber qué piezas usar y cómo fabricarlas. También incluye herramientas para simular y probar virtualmente la resistencia de las piezas mediante FEA (*Finite Element Analysis*), lo que significa que puedes ver cómo se comportará el diseño en el mundo real antes de construirlo. Por último, se puede conectar con otros programas y personalizar tareas para facilitar y automatizar el proceso de diseño, haciendo que todo el ciclo de creación y producción sea más eficiente [68].

Por otro lado, Autocad es un programa que te ayuda a crear dibujos técnicos y planos detallados, facilitando el diseño de edificios, máquinas y otros proyectos. Se trata de un software de CAD (*Computer-Aided Design*), al igual que el anterior software citado, lo que significa que permite elaborar y modificar diseños de forma digital. Con Autocad puedes trabajar en 2D lo que permite realizar el diseño anterior a la extrusión de futuras piezas más complejas y hacer ajustes antes de construirlas en la realidad. Además, utiliza el formato DWG (*Drawing / Dibujo*) para guardar los archivos, garantizando que los diseños sean compatibles y fáciles de compartir con otras plataformas para su posterior modificación como es el caso de Autodesk inventor [69].

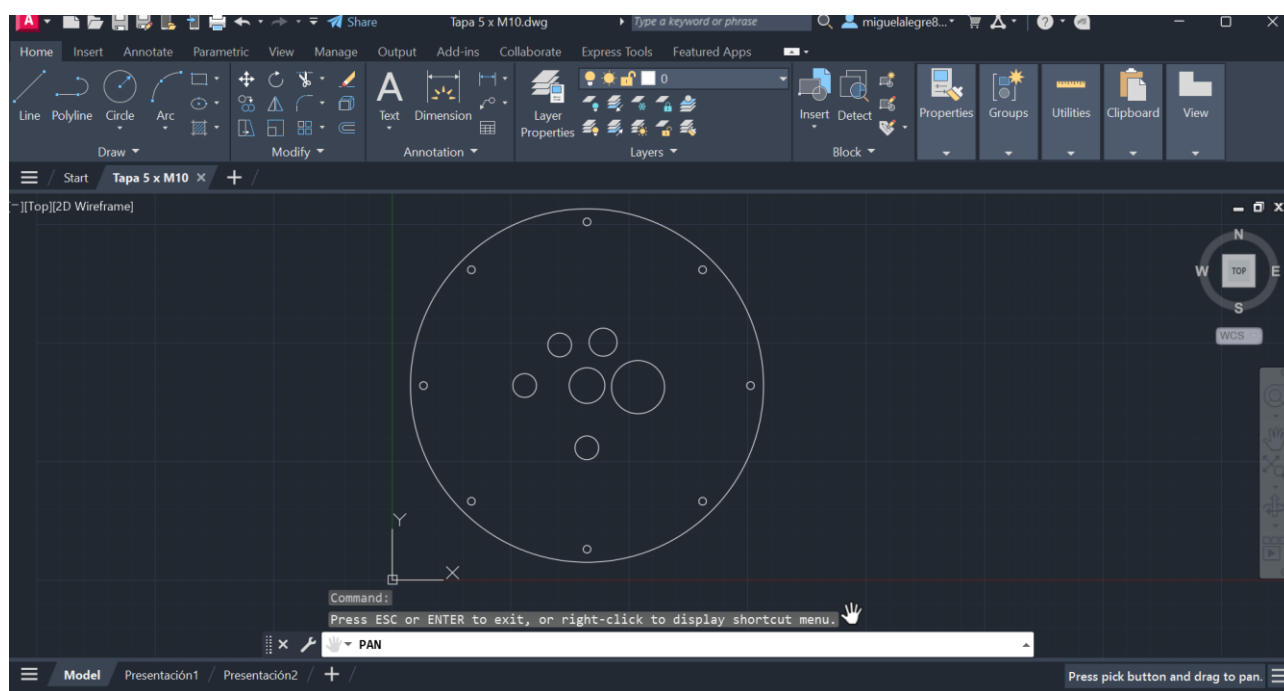


Figura 4-21 Imagen de un diseño de AutoCad (Fuente propia).

4.4.2 Impresión 3D

La impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, consiste en crear objetos físicos a partir de un modelo digital añadiendo material capa a capa, en lugar de quitarlo como ocurre en procesos tradicionales de mecanizado o moldeo. Este proceso permite fabricar piezas con formas muy complejas, pues cada capa se deposita justo donde se necesita. Existen varias tecnologías: FDM (*Fused Deposition Modeling*), que funde un filamento de plástico y lo va depositando; SLA (Estereolitografía), que utiliza una resina líquida solidificada por láser; SLS (Sinterizado Selectivo por Láser), que emplea polvo (generalmente de polímero o metal) para formar capas mediante la acción de un láser, y la impresión 3D

en metal, donde se fusionan polvos metálicos para obtener piezas de gran resistencia. Los materiales más comunes van desde plásticos como ABS, PLA o Nylon, hasta metales (acero, titanio, aluminio) y resinas especiales para usos médicos o industriales. Se utiliza para prototipado rápido y también para producir piezas finales en campos como la medicina (prótesis a medida) o la industria aeroespacial (componentes ligeros y resistentes). Sus ventajas incluyen la posibilidad de crear diseños imposibles de conseguir con otras técnicas, el ahorro de material y la facilidad para fabricar escasas cantidades y especializadas.

Figura 4-22 Imagen de documento Excel usado para consumos y características de piezas impresas (Fuente propia).

Sin embargo, la velocidad de impresión, el coste cuando se necesitan grandes producciones y la necesidad de un acabado extra para suavizar las capas pueden considerarse limitaciones. Una muestra de ello es el Excel presentado (realizado durante la impresión de las piezas necesarias para el proyecto(Figura 4-22)), que pese a no considerarse una gran producción de elementos el tiempo empleado para su fabricación ha sido elevado y no en muchas ocasiones satisfactorio debido a características difíciles de cuantificar como es la porosidad y sensibilidad en impresión [70].

PROPIEDADES	PLA	ABS	PETG
Fuerza máxima	65 MPa	40 MPa	53 MPa
Temperatura máxima de trabajo	52°C	98 °C	73 °C
Coefficiente de dilatación térmica	68µm/m-°C	90 µm/m-°C	60 µm/m-°C
Densidad	1.24 g/cm3	1.04 g/cm3	1.23 g/cm3
Precio por Kg	10 – 40 \$	10 – 40 \$	20 – 60 \$

Tabla 4-1 Propiedades de los materiales utilizados para la impresión 3D [71].

Un hecho fundamental de la realización de las piezas a través de la impresión 3D, es debido a la particularidad de este proyecto, causado por la importancia de la estiba de pesos en un submarino, por ello el PLA ha sido el material a través del cual se han impreso todas las piezas, ya que ofrecía menos probabilidad de deformado en la impresión y debido a su poca porosidad en comparación con el resto de materiales (factor importante ya que nos interesa que todos los mamparos del módulo de lastre sean estancos).

4.4.3 Cortado laser

El cortado láser, también conocido como corte por láser, es una técnica que utiliza un haz de luz altamente concentrado para cortar o grabar materiales de manera precisa y controlada. En lugar de utilizar herramientas al uso, el haz láser aplica una cantidad intensa de energía que funde, quema o vaporiza el material en la zona de contacto, permitiendo realizar cortes limpios y con gran exactitud. Este proceso se utiliza en una amplia variedad de sectores, desde la fabricación de componentes metálicos y la elaboración de diseños en acrílico o madera, hasta aplicaciones en la moda y la decoración, ya que es compatible con materiales tan diversos como metales, plásticos, maderas e incluso textiles. Entre sus ventajas destacan la precisión del corte, la capacidad para realizar diseños complejos y el mínimo impacto en el material, lo que lo hace ideal tanto para la producción en serie como para prototipos.

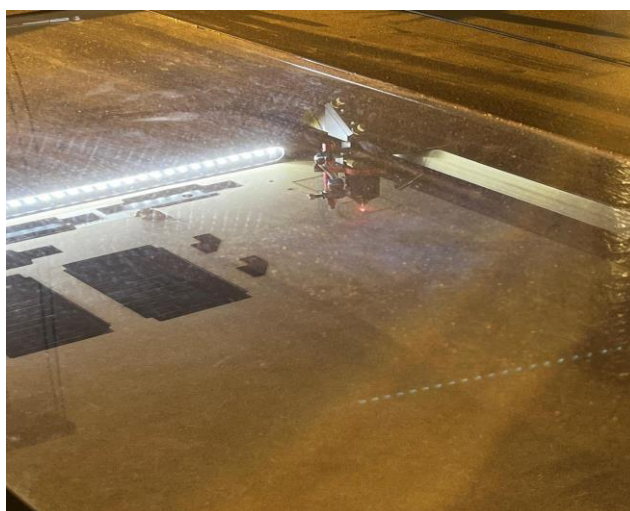


Figura 4-23 Imagen de cortadora laser produciendo la placa de soporte del sistema de módulo de lastre (Fuente propia).

En este proyecto el proceso de cortado laser tan solo se ha llevado a cabo para dos componentes del sistema, ambos relacionados con el montaje de este, uno de ellos es la placa de soporte, donde se ubicarán ambas válvulas, tanto hidráulicas como neumáticas y que como se ha mencionado en el párrafo anterior tratara uno de los materiales especificados como es la madera. Por otro lado, se utilizará para el corte de la tapa de sellado del módulo de lastre la cual está en contacto con el medio exterior y esta estará formada por metacrilato (material resistente a las propiedades abrasivas del agua de mar) [72].

Para realizar el corte de ambas piezas es necesario el uso de la plataforma anteriormente citada (AutoCAD) ya que nos permite exportar nuestros diseños en 2D, formato DWG y nos permite utilizarlos en la aplicación de uso de la maquinaria, conservando todo tipo de medidas y escalas. Este software utilizado es el conocido como “rdworksV8”.

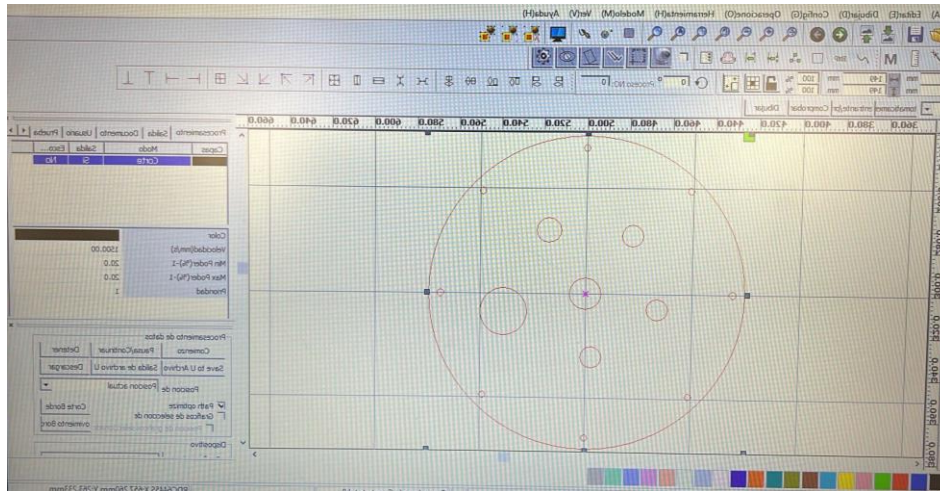


Figura 4-24 Imagen de uso de software rdworksV8 (Fuente propia).

4.5 Método de ensayo

Inicialmente, antes del montaje e incorporación de todos los elementos eléctricos en el interior del módulo, se comprueba que todas las válvulas tienen las dimensiones necesarias para la placa de soporte dimensionada y producida.

Una vez este primer paso ya ha sido realizado, se procede al ensayo y comprobación de todos los elementos del sistema de módulo de lastre, en un primer momento de manera independiente.

Posteriormente, y de forma gradual, se incorporan los distintos elementos pertenecientes al mismo sistema. De tal forma que, al haber comprobado inicialmente tanto el sensor hidráulico, ambas válvulas hidráulicas y haber hecho los códigos pertinentes, y, además, realizar este mismo proceso con la parte neumática del sistema, garantizamos un correcto funcionamiento del sistema global, así como una mayor sencillez en la programación del código global del sistema.

En cuanto a la parte hidráulica se refiere:

- Primero, es necesario comprobar el funcionamiento correcto de todos os elementos individualmente, por ello se comenzará con el sensor de presiones en este caso concretamente, el hidráulico. Para ello realizaremos la conexión pertinente a Arduino UNO y realizaremos un código de ensayo exclusivo para ser conscientes de que dicho sensor toma los datos que necesitamos.

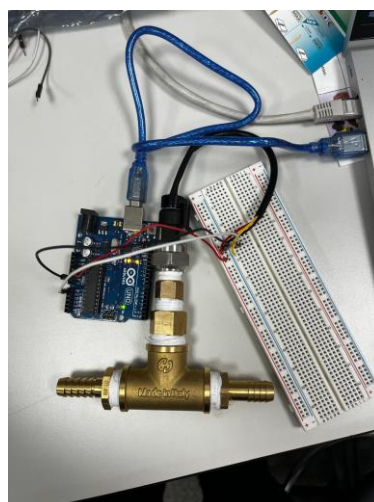


Figura 4-25 Imagen de prueba del sensor de presión hidráulica (Fuente propia).

- En segundo lugar, se necesita comprobar el funcionamiento de las válvulas eléctricas, para ello a través de la investigación sobre su uso se consigue llegar a la conclusión de un correcto montaje empleando tanto Arduino Uno como el módulo de relés, donde se usarán dos de ellos, uno por cada válvula.

Para el desarrollo del código se empieza con un código inicial que tan solo nos permite comprobar que las válvulas se activan, una vez se confirma que se encuentran en perfecto estado, se desarrolla un código que me permite designar que válvula estará encargada de la entrada y cual está encargada de la salida del agua del sistema y establecer a su vez una serie de comandos los cuales permitirán al operador del sistema decidir cuándo se produce el llenado y vaciado del tanque, lo que supondrá que una válvula se encuentre abierta y otra cerrada.

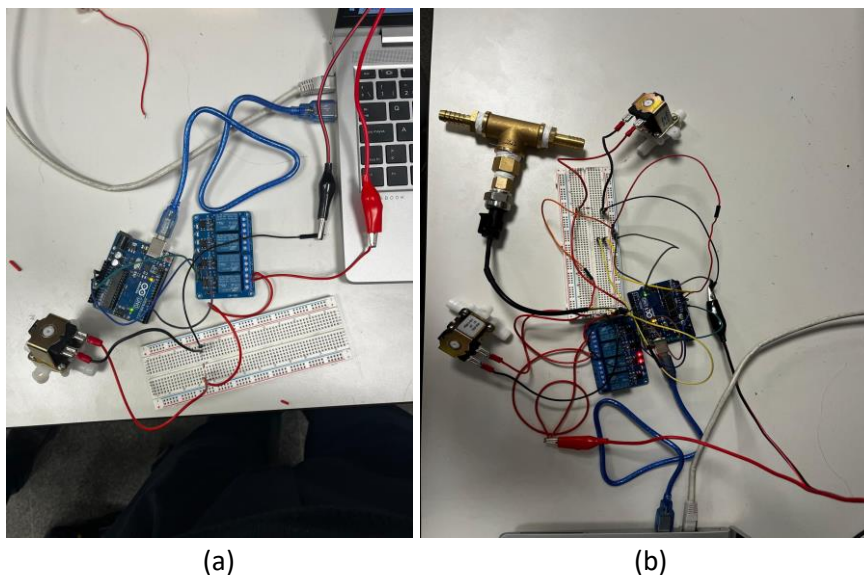


Figura 4-26 y Figura 4-27, Imagen de prueba de válvula hidráulica e Imagen del sistema hidráulico eléctrico configurado en su totalidad (Fuente propia).

Una vez se ha determinado el montaje eléctrico, se enlaza con el montaje físico del sistema para llevar a cabo las pruebas de correcto funcionamiento del sistema en función al código de programación elaborado y a su vez para comprobar el eficiente montaje de cada uno de sus elementos previo a su incorporación al módulo final y a el añadido de la parte neumática. Este proceso es realizado de la manera explicada ya que en caso de realizar tanto el código de programación como el montaje conjunto (parte hidráulica y neumática a la vez) seria de una mayor complejidad detectar errores y hacerlo de manera tan eficiente y asegurando así el funcionamiento e integración de cada una de sus partes.

En cuanto a la parte neumática:

- el procedimiento de montaje se realiza de la misma manera donde primero comprobaremos el funcionamiento del sensor de presión y que este toma datos de manera correcta y a través de la aplicación de aire a presión se observan distintos flujos de aire.

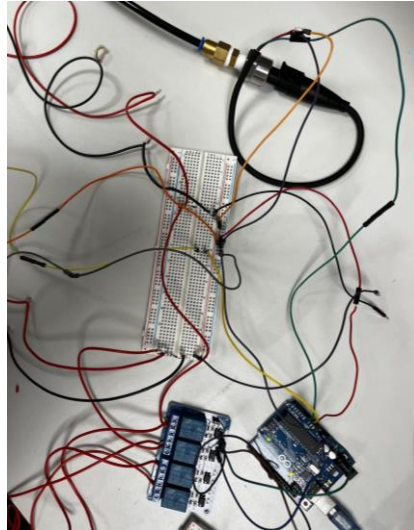


Figura 4-28 Imagen de prueba realizada del funcionamiento del sensor de presión (Fuente propia).

- Posteriormente se comprueba el funcionamiento de las válvulas neumáticas a través del módulo relé, así como se programa su funcionamiento a través de Arduino. El funcionamiento de las mismas se podrá comprobar de manera física a través de los diodos que disponen las propias válvulas en su parte superior indicando, en caso de estar encendidos, que la electroválvula (normalmente cerrada) se encuentra abierta. y por último se realiza el montaje global donde se observará el correcto funcionamiento del sistema.

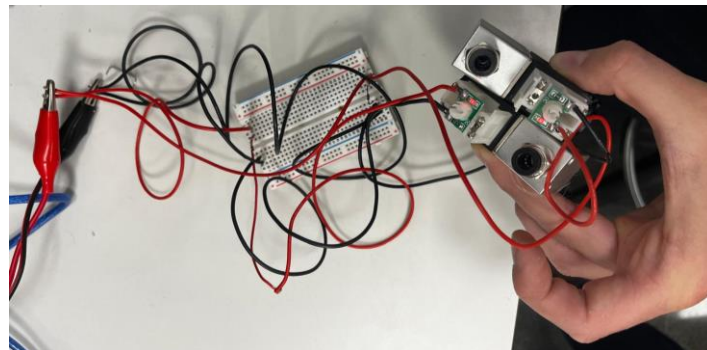


Figura 4-29 Imagen de prueba realizada del funcionamiento de electroválvulas (Fuente propia).

- Finalmente, la integración final de todo ello bajo un mismo código y montaje para llevar a cabo la prueba final donde se comprobará el funcionamiento del sistema de módulo de lastre, así como el funcionamiento y operatividad de los sistemas eléctricos.

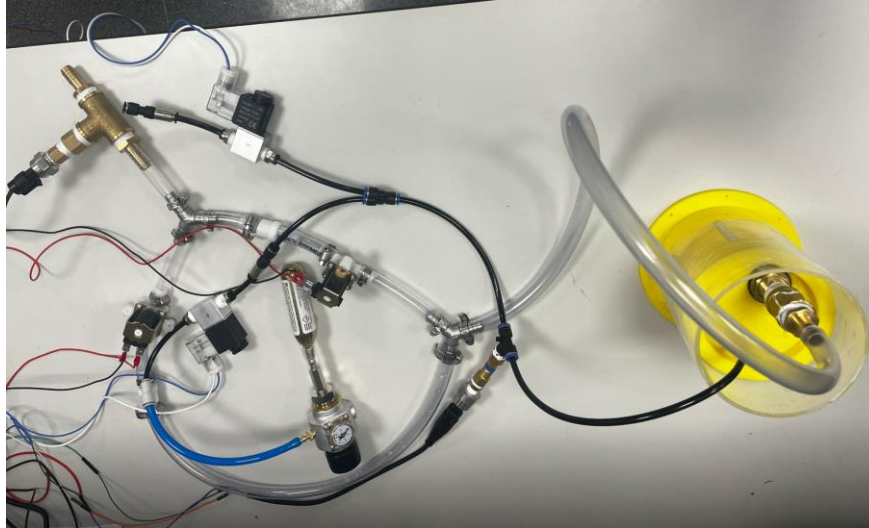


Figura 4-30 Imagen de montaje del módulo de lastre completo (Fuente propia).

5 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA

5.1 Resultados de los ensayos

5.1.1 Ensayo aislado del sistema hidráulico

Mediante el ensayo aislado del funcionamiento del sistema hidráulico, se pretendía comprobar la fiabilidad del sistema, la funcionabilidad de cada una de sus partes y a su vez la efectividad del código programado para un uso correcto de las válvulas. Para todo esto se ha llevado a cabo inicialmente el montaje completo del sistema hidráulico, en el cual se ha simulado el llenado y vaciado del tanque de lastre de dos maneras, para poder comprobar así todo el código de programación y la presión de uso de las válvulas antirretorno.

Inicialmente se ha experimentado con el método de llenado del tanque de lastre en el cual es supuesto que el agua circula desde el mar, pasa por una de las electroválvulas y es conducida al tanque de lastre. Para este caso el tanque de lastre era simulado con una caja estanca para evitar el derrame de agua sobre el laboratorio, y el mar estaba simulado por una botella de agua de 1,5L que proporcionaba al sistema a través de un embudo agua de manera constante. Una vez la válvula de entrada y salida se encontraban abierta, la de entrada, y cerrada, la de salida, se comenzó a introducir de forma constante el caudal de agua. Al entrar el agua en el sistema se manifestaron 3 factores, que nos llevaron a realizar cambios tanto en el propio montaje como en los elementos que lo componían, estos fueron:

1. Pérdidas de agua y por tanto de presión en el sistema.
2. No funcionamiento de las válvulas antirretorno debido a la superior presión de funcionamiento de la válvula con respecto a la escasa presión del sistema. (Figura 4-11).
3. Gran tamaño de los conectores del sistema, lo que imposibilita su incorporación dentro del módulo de lastre debido a un tamaño mayor al diámetro del continente del sistema. (Figura 4-25).

Es por ello por lo que a través de analizar estos nuevos factores y estudiando las distintas posibilidades que ofrece el sistema de lastre se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Implantación de abrazaderas en las salidas y entradas de las electroválvulas y en el acople del tubo al sensor de presión, ya que son las zonas donde existían pérdidas de agua y en el caso del sensor es o que nos permitirá no tener pérdidas de presión y evitar así un mal funcionamiento del sistema de datos proporcionado por el sensor.
2. Sustitución de las válvulas antirretorno por otras de menor presión, ya que inicialmente se trató de eliminar del sistema las válvulas antirretorno para comprobar si el sistema era capaz de funcionar sin la utilización de estas, no obstante observamos que son fundamentales ya que las electroválvulas solo impiden o permiten el paso de agua en su dirección de funcionamiento, y en caso de que hubiese circulación de agua desde el sentido contrario esta sobrepasaría estas electroválvulas.



Figura 5-1 Imagen de nuevas válvulas antirretorno implementadas en el sistema hidráulico (Fuente propia).

3. Sustitución por otros conectores de menor tamaño, pero sin la necesidad de reducir el diámetro de estos, de tal forma que esto permita seguir empleando el mismo tipo de tubo y así no cambiar la totalidad del sistema.



Figura 5-2 Imagen de conectores en forma de “Y” adquiridos tras ensayo (Fuente propia).

Tras el análisis de todos los datos obtenidos para el ensayo, este ha permitido un mayor desarrollo en el montaje del sistema y una mayor eficacia en su funcionamiento, evitando pérdidas de presión y volumen de agua.

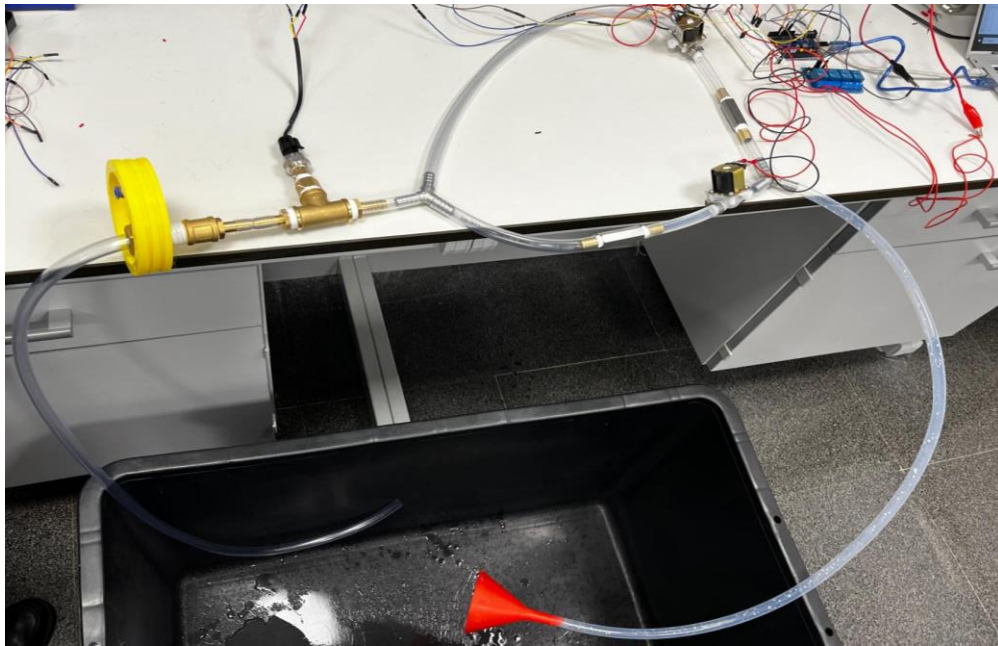


Figura 5-3 Imagen de la prueba realizada del módulo hidráulico del sistema de lastre con la actualización de los nuevos elementos (Fuente propia).

5.1.2 Ensayo aislado del sistema neumático

Mediante este Segundo ensayo se ha llevado a cabo la comprobación del sistema neumático, tanto su montaje como su código, al igual que se realizó en el ensayo anterior.

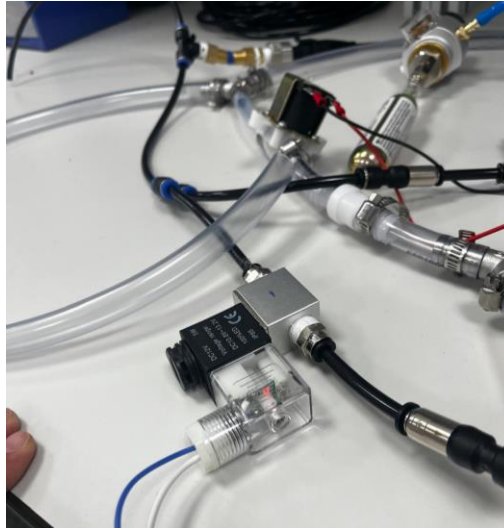


Figura 5-4 Imagen de prueba de sistema neumático en vacío (Fuente propia).

Este ensayo ha supuesto un éxito en cuanto a la programación del sistema debido al funcionamiento sincronizado entre válvulas y código.

Sin embargo, en el montaje no se han podido obtener resultados debido a la imposibilidad por parte de la botella de aire a presión de expulsar CO₂ en la dirección correcta del sistema debido a la ausencia de un adaptador de rosca (Figura 4-3) capaz de conectar el regulador de presiones con la botella. Por ello es necesario un diseño (Figura 3-13), y adquisición de piezas adecuadas, para lograr un ensayo general del sistema.



Figura 5-5 Imagen de nueva pieza para incorporar el CO₂ al sistema (Fuente propia).

5.1.3 Ensayo íntegro del módulo de lastre

Una vez el sistema entero ha sido actualizado en base a los ensayos realizados se puede realizar uno último mediante este tercer ensayo se han conseguido obtener 2 claros resultados, el primero de ellos está materializado en un correcto funcionamiento del código programado (Figura 3-15), esto es debido al funcionamiento correcto de cada una de las válvulas correspondientes al emitir una de las ordenes asignadas desde la plataforma Arduino UNO.

Una muestra de ello es en el momento en el que el sistema se encuentra en espera donde cada una de las electroválvulas se encuentran en su estado natural y todos los relés disponibles se encuentran activados (Figura 4-19). De esta manera los 4 leds disponibles asociados a cada relé se encontrarán encendidos bajo una luz roja.

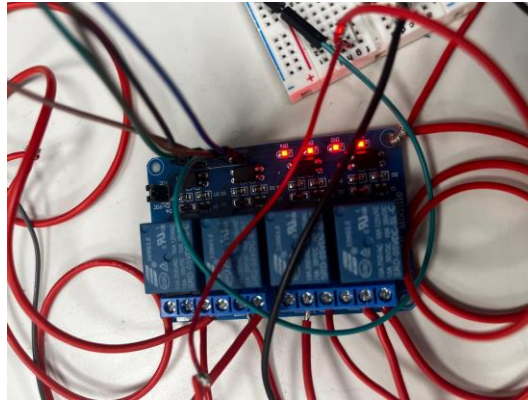


Figura 5-6 Imagen de prueba del circuito eléctrico mediante módulo relé (Fuente propia).

Durante la realización de este ensayo, inicialmente en vacío, se han conseguido obtener graficas que indican el flujo de fluidos que circulan por sus respectivos sistemas y a que presión interactúan estos en los sensores. En el caso actual sus valores no aportan información relevante ya que solo indican que son capaces de obtener datos y mostrarlos en la tabla deseada. Esto será de gran utilidad para medir y comprobar la presión de entrada de agua en el sistema y la presión con la que el CO2 llega al tanque de lastre para llevar a cabo su vaciado de toda el agua depositada anteriormente.

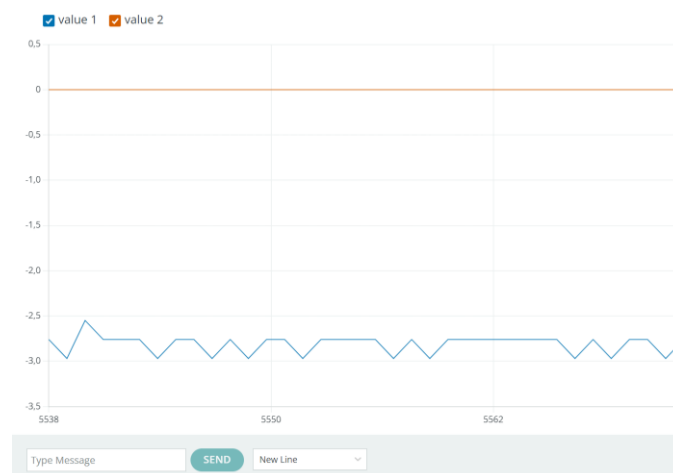


Figura 5-7 Imagen de obtención de datos de los sensores de presión (Fuente propia).

Un aspecto relevante que certifica la funcionalidad de estos sensores de presión es la gráfica proyectada por la acumulación de lectura de datos de los mismos (Figura 5-7). Donde se puede observar que el valor 2 (*value 2*, Figura 5-7) es de 0, correspondiente al sensor hidráulico, y el valor 1 (*value 1*, Figura 5-7), que corresponde con el sensor de aire a presión, es totalmente irregular esto es debido a la presencia de ruido y a la inviabilidad de poder aislar el sistema de forma perfecta.

Otro aspecto a destacar, es la incorporación (tras el análisis de los resultados obtenidos en el ensayo aislado del sistema neumático, Figura 5-4) del acople necesario, tras su diseño, para incorporar correctamente la botella de aire comprimido necesaria para el funcionamiento del sistema.



Figura 5-8 Imagen de acople de botella de aire comprimido (Fuente propia).

Por otra parte, se ha conseguido realizar la prueba del sistema mediante ambos fluidos, para ello se ha realizado en dos fases una de ellas comprobando el sistema de llenado del tanque de lastre de agua y otra de ellas mediante su vaciado. Para el primero el mar ha sido simulado igual que para la prueba aislada del sistema hidráulico, sin embargo, en este caso el sistema hidráulico ya se encontraba actualizado (Figura 5-1 y Figura 5-2) fruto de las experimentaciones anteriores, logrando un correcto funcionamiento del sistema.

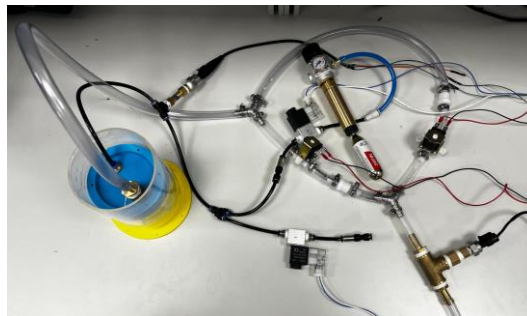


Figura 5-9 Imagen del módulo de lastre tras experimentación (Fuente propia).

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Conclusiones

En conclusión, el desarrollo de este trabajo fin de grado sobre el diseño de un módulo de lastre para un submarino no tripulado se puede considerar satisfactorio. Se han realizado actividades como estudio, diseño y elaboración de los sistemas neumático e hidráulico y a su vez el estudio y correcta programación y montaje del sistema eléctrico dispuesto para el control del sistema de módulo de lastre. Este estudio de cada uno de los sistemas ha permitido el uso de los elementos correctos a la hora de realizar el montaje como son las correspondientes electroválvulas, o las válvulas antirretorno apropiadas a la presión del sistema y los sensores adecuados para las mediciones de presión. La elaboración del proyecto se ha llevado a cabo mediante experimentaciones a través de las cuales se han analizado paso a paso cada componente de los distintos sistemas, así como como el funcionamiento de los propios sistemas de manera independiente, para poder garantizar el correcto funcionamiento del módulo una vez estos hayan sido integrados entre sí.

Para poder llegar al desarrollo final del proyecto se ha llevado a cabo de manera secuencial en distintas fases.

En primer lugar, se ha estudiado el comportamiento del sistema, desde la parte neumática a la hora de comprender el comportamiento del gas a las distintas presiones tras realizar sus correspondientes iteraciones. Todo ello se ha estudiado a través de las distintas leyes de los gases, considerando los distintos tipos de magnitudes que varían en el proceso y cuales se mantienen constantes. Para este proceso se han utilizado herramientas como libros Excel.

Posteriormente a través de simulaciones sobre el comportamiento de los distintos fluidos que circulan por el sistema, se ha diseñado un módulo de lastre acorde a unas presiones de trabajo y con el empleo de una serie de elementos específicos que facilitan la optimización y efectividad del mismo. A través de aplicaciones de modelado 3D y 2D, así como aplicaciones de cortado laser se ha logrado un diseño correcto y formado con los materiales que mejor se han adaptado para ello.

Finalmente se ha procedido al desarrollo de un código de programación en el cual se han establecido relaciones entre los distintos elementos como son los sensores de presión adecuados a cada sistema y sus correspondientes válvulas, todo ello a través de Arduino UNO.

En definitiva, el desarrollo de este proyecto ha incluido el uso de un modelo matemático, la capacidad de diseño y el desarrollo de un código sencillo y eficaz para permitir operar al módulo de lastre.

6.2 Líneas futuras

De cara a futuras versiones del sistema, se contempla la incorporación de una motobomba de pequeño tamaño que permita asistir activamente la entrada de agua al tanque de lastre, especialmente en situaciones donde la presión ambiental no sea suficiente para garantizar un llenado eficiente. Esta mejora permitiría un mayor control sobre la velocidad de inmersión y mayor autonomía operativa.

Asimismo, se propone la implementación de sensores de nivel tanto para el gas como para el agua en el interior del tanque de lastre. Estos sensores permitirían monitorizar en tiempo real el porcentaje de llenado o vaciado del tanque, optimizando las decisiones de control del sistema y mejorando la seguridad y fiabilidad durante las maniobras de inmersión y emersión.

Además, se propone una mejora en la automatización del código en las zonas de espera del sistema y la capacidad de este de mostrar datos en tiempo real, así como la creación de un gemelo digital el cual permita un seguimiento exhaustivo del vehículo.

Estas mejoras contribuirían significativamente a una automatización más precisa y a una respuesta más eficiente del sistema de lastre en condiciones reales de operación.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. V. Medina y C. P. Collazo, «Diseño de un Sistema de Energía y Control de la Orientación de un Planeador Submarino».
- [2] N. Uttaros, J. A. G. Prieto, y C. P. Collazo, «Diseño de un sistema de control de flotabilidad para un planeador submarino».
- [3] L. C. L. Calderón, «Industria 4.0 en países de Latinoamérica, Alemania, China, Estados Unidos y Japón».
- [4] «¿Qué es la Industria 4.0?», Clase Ejecutiva UC. Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.claseejecutiva.com.ec/blog/articulos/que-es-la-industria-4-0/>
- [5] «Estado del arte sobre la aplicación de la industria 4.0 en los sistemas de planificación y control de operaciones», *Rev. Tecnológica Cienc. Educ. Edw. Deming*, ene. 2022, doi: 10.37957/rfd.v6i1.93.
- [6] «PS34_Negro-y-Tovar.pdf». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.funcas.es/wp-content/uploads/2022/01/PS34_Negro-y-Tovar.pdf
- [7] «La cuarta revolución industrial, el “algoritmo de guerra” y su posible aplicación a la Defensa española», Real Instituto Elcano. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.realinstitutoelcano.org/analisis/la-cuarta-revolucion-industrial-el-algoritmo-de-guerra-y-su-posible-aplicacion-a-la-defensa-espanola/>
- [8] «Cuaderno Capacidades.pdf». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.isdefe.es/files/Cuaderno%20Capacidades.pdf>
- [9] Redacción, «Ejército y Fuerza Aérea de Brasil recuperan robot para desactivación de explosivos», *Zona Militar*. Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.zona-militar.com/2021/05/17/ejercito-y-fuerza-aerea-de-brasil-recuperan-robot-para-desactivacion-de-explosivos/>
- [10] S. W. I. swissinfo.ch, «Ucrania: guerra de los drones, sistemas de ataque informatizado e inteligencia artificial», SWI swissinfo.ch. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.swissinfo.ch/spa/ucrania:-guerra-de-los-drones,-sistemas-de-ataque-informatizado-e-inteligencia-artificial/88902758>
- [11] «Armada (@armadaesp) • Fotos y videos de Instagram». Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.instagram.com/armadaesp/>
- [12] E. del M. G. Rico, «Altas tecnologías, conflictos armados y seguridad humana», *Araucaria Rev. Iberoam. Filos. Política Humanidades*, vol. 18, n.º 36, pp. 265-293, 2016.

- [13] «Vehículos autónomos: el camino de la IA hacia un futuro sin conductor». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.hp.com/pe-es/shop/tech-takes/vehiculos-autonomos-e-inteligencia-artificial>
- [14] «Coches autónomos y la movilidad del futuro». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.quadis.es/actualidad/coches-autonomos-y-la-movilidad-del-futuro/71144982>
- [15] D. Rojas-Rueda, M. J. Nieuwenhuijsen, H. Khreis, y H. Frumkin, «Autonomous Vehicles and Public Health», *Annu. Rev. Public Health*, vol. 41, n.º Volume 41, 2020, pp. 329-345, abr. 2020, doi: 10.1146/annurev-publhealth-040119-094035.
- [16] Armada, «Scan Eagle - 11ª Escuadrilla Aérea - Scan Eagle - 11ª Escuadrilla Aeronaves - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/buquesaeronaves/prefLang-es/03flotilla-aeronaves-aeronaves-no-tripuladas>
- [17] E. Press, «Hydroid completa el testeo de REMUS 600 con el Synthetic Aperture Sonar 2040 de HISAS para la marina internacional». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.europapress.es/comunicados/internacional-00907/noticia-comunicado-hydroid-completa-testeo-remus-600-synthetic-aperture-sonar-2040-hisas-marina-internacional-20181127060135.html>
- [18] «TFG_Ana-Laura_Bermejo_Escudero_2017».
- [19] «Science 3D Models | CGTrader». Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cgtrader.com/3d-models/science>
- [20] R. D. InfoDefensa, «Las fuerzas especiales de la Armada recibirán el mini dron Black Hornet 3», Infodefensa - Noticias de defensa, industria, seguridad, armamento, ejércitos y tecnología de la defensa. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/2964745/fuerzas-especiales-armada-recibiran-mini-dron-black-hornet-3>
- [21] R. D. InfoDefensa, «Las fuerzas especiales de la Armada recibirán el mini dron Black Hornet 3», Infodefensa - Noticias de defensa, industria, seguridad, armamento, ejércitos y tecnología de la defensa. Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/2964745/fuerzas-especiales-armada-recibiran-mini-dron-black-hornet-3>
- [22] «Drones submarinos», Global Strategy. Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://global-strategy.org/drones-submarinos-dos-escollos-por-salvar/>
- [23] «cascoantiguopro», cascoantiguopro. Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cascoantiguopro.com/es/blog-cascoantiguopro/post/los-vehiculos-submarinos-autonomos-de-rtsys-tecnologia-sumergible-revolucionaria>
- [24] Infodron, «Exail presentará su dron naval Drix en el marco de la Feria Colombiamar 2025», Infodron. Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.infodron.es/texto-diario/mostrar/5213086/004-colombiamar-exail-promociona-colombiamar-dron-naval-drix>
- [25] F. S. Bergés, «CAPTAS-4», Ejércitos. Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistaejercitos.com/articulos/captas-4/>
- [26] «DESEID2023».
- [27] «DESEID_2023_C Perez-Collazo_MOAUV.pptx».

- [28] «Search results for “ion-litio”», Baterías Online. Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://bateriasonline.com/es/jolisearch?s=ion-litio>
- [29] «Los Tanques de Lastre.» Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.u-historia.com/uhistoria/tecnico/articulos/lastre/lastre.htm>
- [30] «Vehículo submarino no tripulado», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 16 de abril de 2023. Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Veh%C3%ADculo_submarino_no_tripulado&oldid=150592869
- [31] S. H. Restrepo, «SUBMARINO CON SISTEMA DE LASTRE Y DIRECCIONAMIENTO CONTROLADO».
- [32] «02 Miguel Alegre - Glider», Google Drive. Accedido: 1 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1-dXhycVYkCikSIZXK8IMDohi_WD0dD3g
- [33] «TFG000957.pdf». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.comillas.edu/jspui/bitstream/11531/14321/1/TFG000957.pdf>
- [34] «Modulo de lastres S80 (1)».
- [35] «Control del Lastre 4/7», www.elSnorkel.com. Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.elsnorkel.com/2003/10/control-del-lastre-47.html>
- [36] «Sistema de lastre híbrido para submarinos RC». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://www.camne.com.ar/submarinos/sistemalastrehibrido/sistemalastrehibrido.htm>
- [37] «Factores de estabilidad 5/7», www.elSnorkel.com. Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.elsnorkel.com/2003/10/factores-de-estabilidad-57.html>
- [38] «Así es cómo hacen para hundirse y salir a flote los submarinos – ANFRIX». Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.anfrix.com/2007/09/como-hacen-para-hundirse-y-salir-a-flote-los-submarinos/>
- [39] «Microinterruptor - Conocimiento - Huizhou Greotech Electronics Co., Ltd». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.greotech-switch.com/info/micro-switch-38096001.html>
- [40] «Micro Switch Interruptor Con Rodillo KW12-3 – clickelectronica.com». Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://clickelectronica.com/producto/micro-switch-interruptor-con-rodillo-kw12-3/>
- [41] «Micro Switch Interruptor Con Rodillo KW12-3 – clickelectronica.com». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://clickelectronica.com/producto/micro-switch-interruptor-con-rodillo-kw12-3/>
- [42] «TOMO I MANUAL MAQUINAS ESUBMAR Maquinas (1)».
- [43] «Ley de Charles», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 20 de diciembre de 2024. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ley_de_Charles&oldid=164234031
- [44] G. B. V, «Ley de Gay-Lussac | Qué es, en qué consiste, enunciado, fórmula, ejemplos», Euston96. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.euston96.com/ley-gay-lussac/>

[45] «Ley de Boyle-Mariotte», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 4 de marzo de 2025. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ley_de_Boyle-Mariotte&oldid=165846486

[46] G. B. V, «Ley de Avogadro | Qué es, en qué consiste, enunciado, fórmula, aplicaciones», Euston96. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.euston96.com/ley-de-avogadro/>

[47] «Ley de los gases ideales», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 13 de marzo de 2025. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ley_de_los_gases_ideales&oldid=166079772

[48] «ley de los gases ideales», Bing. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.bing.com/search?q=ley+de+los+gases+ideales&form=ANSPH1&refig=934a812d72e74de2ac9dbcd4c8167292&pc=HCTS&dayref=1>

[49] AreaCiencias, «Condiciones Normales y Estándares de un Gas», Areaciencias. Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.areaciencias.com/quimica/condiciones-normales-de-un-gas/>

[50] «Software de simulación FluidSIM | Festo ES». Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.festo.com/es/es/e/educacion/aprendizaje-digital/simulacion-virtual-y-modelado/fluidsim-id_1663056/

[51] «CO2 cartucho», Zéfal. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.zefal.com/es/infladores-co2/7-335-co2-cartuchos.html>

[52] «ES_Tableau de comparaison CO2 (1)».

[53] «Heschen Electroválvula neumática eléctrica 2V025-08 12VDC PT1/4 2/2 vías normalmente cerrada IP65 CE : Amazon.es: Industria, empresas y ciencia». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.amazon.es/dp/B072ZZK9SD/?coliid=I3PPUY3LGT4XZA&colid=2VFAAH2Q7AVWB&pssc=1&ref_=abl_lv_ov_lig_dp_it

[54] «ERGAOBOY 2 Piezas 6mm Conectores de válvula de retención de aire comprimido, empujón de flujo de aire para conectar accesorios : Amazon.es: Bricolaje y herramientas». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.amazon.es/ERGAOBOY-Conectores-retenci%C3%B3n-comprimido-accesorios/dp/B09NFFW19C/ref=sr_1_16?adgrpid=1305120738293081&dib=eyJ2IjoiMSJ9.PZNDBBWC7v7Sgo1rnH9Z1_o75zVYySgaiCfLitnEXc2XFasVsGD5kn5stepZ2mackqDNiCzYnGSo_shY-ir6Aqxu2XqSaYdT9ogT3vZnWFjurHxGPPUOPSrK2woMY33GKrRdx7iYta34iS5OaJttHiLJuaRC52ba2QG2fH3HlsAtXumPjjbw6PPtWt9WnE4rXQzXe1zpJDE9fjBLSpTnVBp56UFbD1LEhXjw3jN4LQWUknuWtS_Nx0W1SuHvNDjPNGw-WFrK0bC-WcEh1kFsfHDBSUkt0JGQuYg20yq-swN4VU0ubIg_5Z0Sk8i8OL0c6BjBqt8uajpRevdWrYFN_fYqUJOB0dkDIZc_GGdDZiFHMtA_lsB_qkNI3Mf7f1DvTA97uktNDvfpx9aSEMFTZy5azz2FkfvP8WMcmQ4F2PvSy1S4m3yoc3fc7KbSJXW.-YdGgeUbeQsBH8VWDYF7U07jvJS8R2nvGbJnMoJnc8o&dib_tag=se&hvadid=81570134982861&hvbmt=bp&hvdev=c&hvllocphy=3217&hvnweto=o&hvmqmt=p&hvtargid=kwd-81570282750990%3Aloc-170&hydadcr=19206_1838127&keywords=antirretorno%2B6mm&qid=1742299036&sr=8-16&th=1

[55] «Sensor de Transductor de Presión G1/4", Sensor de Presión de Acero Inoxidable Dc 5V Para Agua, Aire, Gas, Combustible, Diesel(0-300Psi) : Amazon.es: Industria, empresas y ciencia». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.amazon.es/Transductor->

Presi%C3%B3n-Inoxidable-Combustible-0-300Psi/dp/B07YZGBVLM/ref=sr_1_18_sspa?__mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=GDCIZVIPASV2&dib=eyJ2IjoiMSJ9.r7wUe8_PVNJVqlV1YBBaR-VcbTNOQLXNd287wGN7iNzL6XRE1esBwrGYH8Eoz_6U6QSE20CD8_2obNSIMRQID2zFHq8nUQayuAK9VDdMR2zXblT6r3GQ17qS7CPrNgrQM6zo3MBb9JGUbc5FvTrrwCSHKUBX9FTmQct3AdxHSwW6gp-iyTnZ8w0yPB6880JKh0DKHCg3Zqm_1EPbwH9MxcixyXFGUktA4t6TSP4hAHDSC-qyjGnd1ke1zQFIzer5Ry4wz_vH2U7iEKoa-6oDSs0_5EOBZDf2KqCHCYjGtc.EYm99zVAc2WtCfk4KxK2vRNwc6QBz-soK-XEIg9r3Fw&dib_tag=se&keywords=sensor+de+aire+a+presion&qid=1742295577&srefix=sensor+d+aire+a+presion%2Caps%2C102&sr=8-18-spons&sp_csd=d2lkZ2V0TmFtZT1zcF9tdGY&pssc=1

[56] «QWORK® Manguera Aire de Poliuretano PU, Manguera de Aire Neumática 6 mm OD x 4 mm ID, 10 Metros, Negro : Amazon.es: Bricolaje y herramientas». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.amazon.es/QWORK-Manguera-Poliuretano-Neum%C3%A1tica-Metros/dp/B09DVXKFM5/ref=sr_1_6?adgrpid=1310618295125854&dib=eyJ2IjoiMSJ9.vXcq7LWchcjdHseCN6BspA1wiztDAzTPsbFlaE1cm8wzrmib_UcSF8rGWt4oBZsmbQP7feYDNQnXZ9oLfBT21ddm9triTArn_-2SjRpsiGkicKMv4WgUzbZ967-P9n6VOc1yQwPH21L491plbngJfoJYG-fj3ErKpGHE7U21O4G6iSUQMhAnS4sIwVi1jOJXGOHgjTu3KzoK1KujDgpr4m4vkGXl2V5RoDxUX3D2rUI97C07JNJ60kb166PLM-l2tiR16waycsqx8cettx95j8wcHYR1q5YU5CltdmIOYGykaVXE7wc9ZvlezlITaNntOSAxUszguZtv31P3E35xSNJxZN_QVeTWCS1calx2DM68Rlb-yGxXXVvI43Jitlv5iMmQoK17uAjlunvCgjjwRWEwLfXTQyUhh_iafyRLKeA1b_pMTc1ZBectce-rIPBk.mJbUvVH4bqeLnLkHuPn07PBFQ7dhitAw9Be1Pa86_kY&dib_tag=se&hvadid=81913732252562&hvbmt=bp&hvdev=c&hvlcphy=3217&hvnetw=o&hvmqmt=p&hvtargid=kwd-81913879757173%3Aloc-170&hydadcr=5162_1864779&keywords=tubo+6mm+aire&msslkid=90a3b5e9f8281dc50f47d230a9c40237&qid=1742295534&sr=8-6

[57] «HUAZIZ 10metros 32.8ft Pneumatic Transparente Manguera Aire Poliuretano, Aire de PU Tubo Manguera, 6 mm(Diámetro Exterior) x 4mm (Diámetro Interior) con 14 piezas Guarniciones Neumaticas(Negro) : Amazon.es: Bricolaje y herramientas». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.amazon.es/HUAZIZ-Transparente-Poliuretano-Guarniciones-Neumaticas/dp/B0BZ46MQRH/ref=sr_1_31?__mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=ATQ7VHNQJ9UU&dib=eyJ2IjoiMSJ9.RPay06DWD8avbqFBwSCyWB0vPO5DkrNudghzNu-avKB_6e2WUgTIY-OZFNZPTT8vqTmy26orPne1giNWvpefnV2obW941V-wz3uRpedra3xQqJyAuWlodQTYzR0Oxy008GCdEkZPGwND9BIV_AaN_U-ym4kIKCUeFwRQo_5A5zQsOju3I3_duBLCqzQR8GTt-aYo6yMwfUpIzYUlr3rel-x4A1PNoZ4B-hS8ccheRydHhoR8FEfN2XGIC4gNG5VC-dxtNRibvx1bWp8t_tg5dkocPCnci49Tn3Qn_nFjr-SeJWmht1gXhUq-57EggEx1XVzZRWuqqbb_E1CUnJTKlq_lfD9FU4CoIbtHbWqVB00Bwg0dcwRDNQW99oxr6V9Fm6ZtDzzxoGwKu5WfL8SqbgBOeQx16J9ichqgyE6itGd5VQqra3WpxciH8wSzUSXR.ORUBf28fDa8P6-NIPL04kaYkWdu4eX1MLupfcsVVhQQ&dib_tag=se&keywords=pasamamparos%2Bpara%2Bmanguera%2B6%2Bmm&qid=1742295629&srefix=pasamamparos%2Bpara%2Bmanguera%2B6%2Bmm%2Caps%2C89&sr=8-31&th=1

[58] «Válvula solenoide de CC de 12 V, válvula electromagnética de interruptor de flujo de entrada de agua de interruptor electromagnético normalmente cerrada de 12 mm : Amazon.es: Industria, empresas y ciencia». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.amazon.es/dp/B07RX1KRG1/?coliid=I3EUG7L756IEQV&colid=2VFAAH2Q7AVWB&pssc=1&ref_=abl_lv_ov_lig_dp_it

[59] «SRJQXH 2 Piezas Válvula Unidireccional 1/4 ", Color Plateado Válvula de Retención de Aire de Cobre Válvula de Retención de Aire y Gas, Utilizado para Calderas y Recipientes a Presión : Amazon.es: Bricolaje y herramientas». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.amazon.es/SRJQXH-Unidireccional-Retenci%C3%B3n-Utilizado-Recipientes/dp/B0962NZZ41/ref=sr_1_6?__mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=CQZ02DMQ0GJH&dib=eyJ2IjoiMSJ9.DkaZ2tMtWohleA_zNvSgF0ZBNShU3v_TG4vIsUx5ljzDUqwtah_PQBqyGkGuMhKhvDN5UFvYkwAK0D8-qHmH74ECGSC3912ox9oxROpwDr_a6BFUTknz_AD7kDFcQRFnsJOe_HzyLhD0ocOvIPsXQQbWoE95ZFk-](https://www.amazon.es/SRJQXH-Unidireccional-Retenci%C3%B3n-Utilizado-Recipientes/dp/B0962NZZ41/ref=sr_1_6?__mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=CQZ02DMQ0GJH&dib=eyJ2IjoiMSJ9.DkaZ2tMtWohleA_zNvSgF0ZBNShU3v_TG4vIsUx5ljzDUqwtah_PQBqyGkGuMhKhvDN5UFvYkwAK0D8-qHmH74ECGSC3912ox9oxROpwDr_a6BFUTknz_AD7kDFcQRFnsJOe_HzyLhD0ocOvIPsXQQbWoE95ZFk-UFTPpsn5xMKx9s3cO1LicNRw3QGhnRN_rTNKnxvaGRMrRTY6EyP3l7MkTKTnb2pkWLpYMTtA6Q_5f974p_26xfUCWIrEuqu_9Ecd7oi8lUT84wTrMZA&dib_tag=se&keywords=v%C3%A1lvula+antirretorno&qid=1742295488&s=tools&prefix=valvula+antirretorno%2Cdiy%2C99&sr=1-6)

UFTPpsn5xMKx9s3cO1LicNRw3QGhnRN_rTNKnxvaGRMrRTY6EyP3l7MkTKTnb2pkWLpYMTtA6Q_5f974p_26xfUCWIrEuqu_9Ecd7oi8lUT84wTrMZA&dib_tag=se&keywords=v%C3%A1lvula+antirretorno&qid=1742295488&s=tools&prefix=valvula+antirretorno%2Cdiy%2C99&sr=1-6

[60] «TECNOIOT 1pc DC 5V G1 / 4 Transmisor de Sensor de presión Transductor de presión 1.2 MPa 174 PSI : Amazon.es: Industria, empresas y ciencia». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.amazon.es/dp/B098R8VRRY/?coliid=I3DV7KYCDVS1NI&colid=2VFAAH2Q7AVWB&pssc=1&ref_=abl_lv_ov_lig_dp_it

[61] «Yesallwas 8mm (diámetro Interior) x 10mm (diámetro Exterior) Tubo Flexible de PVC, Tubo Transparente de 3 Metros, Manguera Multipurpose, Manguera de Agua para Tanque y Acuario : Amazon.es: Industria, empresas y ciencia». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.amazon.es/Yesallwas-pl%C3%A1stico-transl%C3%BAcido-transparente-di%C3%A1metro/dp/B07NZBJXJZ/ref=sr_1_3?__mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=27323MC88EAMG&dib=eyJ2IjoiMSJ9.ZtkTwVn93L7p-lq6OzTr9fyEVEw7G33aTm5JWhkkBVwrD83KM-HytmW8-MYDpJadUb_XbElNvQSGSg3pXdMcQnwb4fMjbyALh_Y3osGbu--ZP3blR-IxT7Xncg8ZQ5VnbyB8o3Q_EA6DbKxaFlylogf7l2HPNQ_tRbdIIgDKmMLUtpJiO3y5biaW8jj1BLaGq2wXl3NILE-Nw5Cl9_Ml--yeL4yS63JjBpifqlGA0JUyCXVhEvToCGKlak-ynUv743yOJdioKGdHCnZxCLXjv9QxSs87U3arylho3lJ8EjOsZJ7fzfSTVpoQYdwMVZlw5rBAoRw-JdpKf7aBy4VYy8eoZnLfzDubkVcpx0M1KA.5X3f7GqThV_rwuRAIjaDXHQ0zLfEiT8tly4SSys3CBk&dib_tag=se&keywords=maguera+de+8+mm+hidraulica&qid=1742295890&s=industrial&prefix=maguera+de+8+mm+hidraulica%2Cindustrial%2C89&sr=1-3

[62] «M METERXITY 5 Paquete Latón Espiga Manguera Conectores - Tubería Accesorio Adaptador para Transporte Aire Fluido, Aplicar Industria (0.47" Espiga x G3/8 Macho Rosca, Tono dorado) : Amazon.es: Industria, empresas y ciencia». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.amazon.es/METERXITY-Paquete-Espiga-Manguera-Conectores/dp/B0C9ZTRVK5/ref=sr_1_31_sspa?__mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=2A9IYRB8K0X0K&dib=eyJ2IjoiMSJ9.Ri8vKiCGVFNPvQZTKnQxdEcNln0eJH_UF3sun6ETNk6uhffcsFu7iBHcypBb73txNfWyo5wmDdQm-Dhuu48e14IIS0gxk0Nn8FOVpbVX29Yyr4RscPLDigP7vsfiGDQ839n6nNedfPNN0FXyCTf1LOQ4fgE5WFyaqjv8ei0vQd9c3uS8PdkH1au-FXIDDz4Tnwq5q0pHUGREemKyei6Rlzc6w5a4tN3Ln4cX8j7SHhywWf5PD7E0EiEMvzaTTQEQN d3swtm25fw8J_Z9BJsPNrEtwxPOeUNlcKcWLHNWr14.UuEb-ZQ2gWDyjqRMCMSfPSdseSQmSZFF0tc7CqhE44Q&dib_tag=se&keywords=pasamamparos+manguera+de+8+mm+hidraulica&qid=1742295945&s=industrial&prefix=pasamamparos+maguera+de+8+mm+hidraulica%2Cindustrial%2C89&sr=1-31-spons&sp_csd=d2lkZ2V0TmFtZT1zcF9idGY&pssc=1

[63] «A ABSOPRO 2uds 8mm 1/4" BSP Hembra Rosca Conector para Manguera de Combustible Adaptador de Latón : Amazon.es: Coche y moto». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.amazon.es/ABSOPRO-Conector-Manguera-Combustible-Adaptador/dp/B0BS1CQ9ZW/ref=sr_1_29_sspa?__mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3

%95%C3%91&crd=2A9IYRB8K0X0K&dib=eyJ2IjoiMSJ9.Ri8vKiCGVFNPvQZTKnQxdEcNln0eJH_UF3sun6ETNk6uhffcsFu7iBHcypBb73txNfWyo5wmDdQm-Dhuu48e14IIS0gxk0Nn8FOVpbVX29Yyr4RscPLDigP7vsfiGDQ839n6nNedfPNN0FXYcTf1LOQ4fgE5WFyaqjv8ei0vQd9c3uS8PdkH1au-FXIDDz4Tnwq5q0pHUGREemKyei6Rlzc6w5a4tN3Ln4cX8j7SHhywWf5PD7E0EiEMvzaTTQEQN d3swtm25fW8J_Z9BJsPNrEtwxPOeUNlcKcWLNHNWr14.UuEb-ZQ2gWDyjqRMCMSfPSdseSQmSZFF0tc7CqhE44Q&dib_tag=se&keywords=pasamamparos+manguera+de+8+mm+hidraulica&qid=1742295945&s=industrial&sprefix=pasamamparos+maguera+de+8+mm+hidraulica%2Cindustrial%2C89&sr=1-29-spons&sp_csd=d2lkZ2V0TmFtZT1zcF9idGY&pssc=1

[64] «▷ Curso de Arduino Gratis 100% Explicado desde Cero [2025]», Control Automático Educación. Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://controlautomaticoeducacion.com/arduino/>

[65] I. Mecafenix, «Arduino ¿Que es, como funciona? y sus partes», Ingeniería Mecafenix. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ingmecafenix.com/electronica/programacion/arduino/>

[66] O. V. Bautista, «Componentes de la Placa de Arduino».

[67] «Domina el control de dispositivos de alto voltaje con este tutorial de relé Arduino - ¡Descubre cómo hacerlo!» Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cabotinoso.es/tutorial-de-rele-arduino-control-de-dispositivos-de-alto-voltaje-con-arduino/>

[68] «Inventor 2023 Ayuda | Manual del ingeniero | Autodesk». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://help.autodesk.com/view/INVENTOR/2023/ESP/?guid=GUID-C2452393-D245-49DA-AFBC-9E67830ECEEF>

[69] «Guía de comandos y atajos de teclado de AutoCAD | Autodesk». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.autodesk.com/latam/shortcuts/autocad>

[70] «Ultimate 3D Printing Material Properties Table». Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/properties-table/>

[71] abax3d, «PLA y otros materiales de impresora 3D: Características de filamentos», Abax Engineering Solutions. Accedido: 17 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://abax3dtech.com/2020/11/20/pla-y-otros-materiales-de-impresora-3d-caracteristicas-de-filamentos/>

[72] «GUIA CORTADORA LASER.pdf». Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.edu.xunta.gal/centros/ceipvalleinclanoleiros/system/files/GUIA%20CORTADORA%20LASER.pdf>

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene una serie de implicaciones que, si bien parten de un proyecto a escala, pueden extrapolarse a entornos reales en el ámbito de la ingeniería naval y de sistemas autónomos subacuáticos.

Desde el punto de vista social, este sistema puede contribuir a la mejora de plataformas de exploración, vigilancia y rescate marítimo, ámbitos con impacto directo en la seguridad de personas, el conocimiento del medio marino y el apoyo logístico en situaciones de emergencia. Su aplicación en vehículos no tripulados permite reducir riesgos humanos en operaciones complejas, así como apoyar misiones de carácter científico o militar sin necesidad de intervención directa.

En términos económicos, el sistema desarrollado apuesta por la modularidad, la reutilización de componentes y el empleo de materiales y tecnologías accesibles (como Arduino y válvulas estándar), lo que lo convierte en una solución rentable. Este tipo de diseño puede implementarse en prototipos de bajo coste, facilitando la investigación, docencia y desarrollo industrial en etapas tempranas, minimizando la inversión inicial y maximizando la formación técnica y funcional.

Respecto al impacto ambiental, el sistema propuesto ha sido concebido con criterios de eficiencia energética y mínimo consumo de recursos. El uso de aire comprimido como fluido principal evita el vertido de sustancias contaminantes al medio marino, y la gestión de agua se realiza de forma cerrada y reversible, sin alterar significativamente el entorno. Además, el prototipo puede contribuir a futuros desarrollos de vehículos subacuáticos que apoyen el estudio de ecosistemas marinos sin generar huella ecológica negativa significativa.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

La realización de este Trabajo de Fin de Grado, centrado en el diseño e implementación de un sistema de lastre para un vehículo submarino, implica asumir una serie de consideraciones éticas y sociales que van más allá de la propia construcción técnica del prototipo.

Desde una perspectiva ética, el desarrollo de sistemas automatizados y autónomos, especialmente en entornos sensibles como el medio marino, exige una actitud responsable por parte las empresas productoras. Es fundamental garantizar que las soluciones tecnológicas no se conviertan en herramientas que perjudiquen el ecosistema ni que se utilicen con fines inadecuados o sin supervisión adecuada. Toda intervención tecnológica debe tener como prioridad el bienestar de las personas y el respeto por el entorno en el que se aplica.

Socialmente, este proyecto pone de manifiesto el conocimiento técnico como motor de desarrollo y seguridad. Un sistema como el diseñado podría aplicarse, en versiones más avanzadas, a plataformas destinadas a tareas como el rescate subacuático, la vigilancia costera o el apoyo en misiones científicas. Estas aplicaciones tienen un claro impacto positivo en la sociedad, ya que permiten ampliar las capacidades humanas en escenarios de riesgo, reduciendo la exposición directa de operadores.

Además, el uso de tecnologías abiertas y accesibles, como Arduino, también refuerzan esta visión ética del desarrollo tecnológico: compartir el conocimiento, democratizar el acceso a herramientas de innovación y promover soluciones que puedan ser adaptadas o mejoradas por otros profesionales, investigadores o estudiantes.

ANEXO III: FICHA DE DATOS DEL CARTUCHO CO₂

Ficha de datos de seguridad según 1907/2006/CE, Artículo 31

fecha de impresión 06.04.2017

Número de versión 1

Revisión: 06.04.2017

SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

- **1.1 Identificador del producto**
- **Nombre comercial:** CARTOUCHE CO2
- **Número CE:**
204-696-9
- **1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados**
No existen más datos relevantes disponibles.
- **Utilización del producto / de la elaboración** cartucho de CO2 presión.
- **1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad**
- **Fabricante/distribuidor:**
ZEFAL
ZI des Cailloux
45150 Jargeau - France
Tel: +33(0)2 38 59 70 45
Fax: +33(0)2 38 59 99 14
Email: zefal@zefal.com / Mr Brunet
- **1.4 Teléfono de emergencia:**
Spain - Tel : 34 915 620 420 (24h.)
France (ORFILA 24h/24) - Tel : +33 (0)1 45 42 59 59 _ EU Tel : 112

SECCIÓN 2: Identificación de los peligros

- **2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla**
- **Clasificación con arreglo al Reglamento (CE) n° 1272/2008**



GHS04

Press. Gas D H280 Contiene gas a presión; peligro de explosión en caso de calentamiento.

- **2.2 Elementos de la etiqueta**
- **Etiquetado con arreglo al Reglamento (CE) n° 1272/2008**
La sustancia se ha clasificado y etiquetado de conformidad con el reglamento CLP.
- **Pictogramas de peligro**



GHS04

- **Palabra de advertencia** Atención
- **Indicaciones de peligro**
H280 Contiene gas a presión; peligro de explosión en caso de calentamiento.
- **Consejos de prudencia**
P102 Mantener fuera del alcance de los niños.
P410+P403 Proteger de la luz del sol. Almacenar en un lugar bien ventilado.
- **2.3 Otros peligros**
- **Resultados de la valoración PBT y mPmB**
- **PBT:** No aplicable.
- **mPmB:** No aplicable.

**Ficha de datos de seguridad
según 1907/2006/CE, Artículo 31**

fecha de impresión 06.04.2017

Número de versión 1

Revisión: 06.04.2017

Nombre comercial: CARTOUCHE CO2

(continúa en página 1)

SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes

- **3.1 Caracterización química: Sustancias**
- **Número(s) de identificación**
- **Número CE:** 204-696-9
- **SVHC -**

SECCIÓN 4: Primeros auxilios

- **4.1 Descripción de los primeros auxilios**
- **Instrucciones generales:** No se precisan medidas especiales.
- **En caso de inhalación del producto:** Suministrar aire fresco. En caso de trastornos, consultar al médico.
- **En caso de contacto con la piel:** Por regla general, el producto no irrita la piel.
- **En caso de contacto los ojos:** Limpiar los ojos abiertos durante varios minutos con agua corriente.
- **En caso de ingestión:** Consultar un médico si los trastornos persisten.
- **4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados** No existen más datos relevantes disponibles.
- **4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente**
No existen más datos relevantes disponibles.

SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios

- **5.1 Sustancias extintoras apropiadas:**
CO2, polvo extintor o chorro de agua rociada. Combatir incendios mayores con chorro de agua rociada o espuma resistente al alcohol.
- **5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla** No existen más datos relevantes disponibles.
- **5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios**
- **Equipo especial de protección:** No se requieren medidas especiales.

SECCIÓN 6: Medidas en caso de vertido accidental

- **6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia** No es necesario.
- **6.2 Precauciones relativas al medio ambiente:** No se requieren medidas especiales.
- **6.3 Métodos y material de contención y de limpieza:** No se requieren medidas especiales.
- **6.4 Referencia a otras secciones** No se desprenden sustancias peligrosas.

SECCIÓN 7: Manipulación y almacenamiento

- **7.1 Precauciones para una manipulación segura** No se requieren medidas especiales.
- **Prevención de incendios y explosiones:** No se requieren medidas especiales.
- **7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades**
- **Almacenamiento:**
- **Exigencias con respecto al almacén y los recipientes:** No se requieren medidas especiales.
- **Normas en caso de un almacenamiento conjunto:** No es necesario.
- **Indicaciones adicionales sobre las condiciones de almacenamiento:** Ningunos
- **7.3 Usos específicos finales** No existen más datos relevantes disponibles.

(continúa en página 3)

**Ficha de datos de seguridad
según 1907/2006/CE, Artículo 31**

fecha de impresión 06.04.2017

Número de versión 1

Revisión: 06.04.2017

Nombre comercial: CARTOUCHE CO2

(continua en página 2)

SECCIÓN 8: Controles de exposición/protección individual**· Instrucciones adicionales para el acondicionamiento de instalaciones técnicas:**

Sin datos adicionales, ver capítulo 7.

· 8.1 Parámetros de control**· Componentes con valores límite admisibles que deben controlarse en el puesto de trabajo:****124-38-9 dióxido de carbono (50-100%)**LEP (ES) Valor de larga duración: 9150 mg/m³, 5000 ppm
VLIIOELV (EU) Valor de larga duración: 9000 mg/m³, 5000 ppm**· Indicaciones adicionales:** Como base se han utilizado las listas vigentes en el momento de la elaboración.**· 8.2 Controles de la exposición****· Equipo de protección individual:****· Medidas generales de protección e higiene:**

Se deben observar las medidas de seguridad para el manejo de productos químicos.

· Protección respiratoria: Si la ventilación es insuficiente, usar protección respiratoria.**· Protección de manos:**

El material del guante deberá ser impermeable y resistente al producto / sustancia / preparado.

· Material de los guantes

La elección del guante adecuado no depende únicamente del material, sino también de otras características de calidad, que pueden variar de un fabricante a otro. Teniendo en cuenta que el producto está fabricado a partir de diferentes materiales, su calidad no puede ser evaluada de antemano, de modo que los guantes deberán ser controlados antes de su utilización.

· Protección de ojos: No es necesario.**SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas****· 9.1 Información sobre propiedades físicas y químicas básicas****· Datos generales****· Aspecto:**

Forma: Gaseiforme

Color: Incoloro

· Olor: Característico

· Cambio de estado

Punto de fusión/punto de congelación: -56,6 °C

Punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición: -78,5 °C

· Punto de inflamación: No aplicable.

· Temperatura de ignición: No aplicable.

· Temperatura de descomposición: 31 °C

· Temperatura de auto-inflamación: El producto no es autoinflamable.

· Propiedades explosivas: El producto no es explosivo.

· Presión de vapor a 20 °C: 57300 hPa

· Densidad a 20 °C: 1,52 g/cm³

(continua en página 4)

Ficha de datos de seguridad
según 1907/2006/CE, Artículo 31

fecha de impresión 06.04.2017

Número de versión 1

Revisión: 06.04.2017

Nombre comercial: CARTOUCHE CO2

(continua en página 3)

- | | |
|--|--|
| · Solubilidad en / miscibilidad con agua a 20 °C: | 2000 g/l |
| · Concentración del disolvente:
VOC (CE) | 0,00 % |
| · 9.2 Otros datos | No existen más datos relevantes disponibles. |

SECCIÓN 10: Estabilidad y reactividad

- **10.1 Reactividad** No existen más datos relevantes disponibles.
- **10.2 Estabilidad química**
- **Descomposición térmica / condiciones que deben evitarse:** No se descompone al emplearse adecuadamente.
- **10.3 Posibilidad de reacciones peligrosas** No se conocen reacciones peligrosas.
- **10.4 Condiciones que deben evitarse** No existen más datos relevantes disponibles.
- **10.5 Materiales incompatibles:** No existen más datos relevantes disponibles.
- **10.6 Productos de descomposición peligrosos:** No se conocen productos de descomposición peligrosos.

SECCIÓN 11: Información toxicológica

- **11.1 Información sobre los efectos toxicológicos**
- **Toxicidad aguda** A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.
- **Efecto estimulante primario:**
- **Corrosión o irritación cutáneas**
A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.
- **Lesiones o irritación ocular graves**
A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.
- **Sensibilización respiratoria o cutánea**
A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.
- **Efectos CMR (carcinogenicidad, mutagenicidad y toxicidad para la reproducción)**
- **Mutagenicidad en células germinales**
A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.
- **Carcinogenicidad** A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.
- **Toxicidad para la reproducción**
A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.
- **Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición única**
A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.
- **Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición repetida**
A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.
- **Peligro de aspiración** A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación.

SECCIÓN 12: Información ecológica

- **12.1 Toxicidad**
- **Toxicidad acuática:** No existen más datos relevantes disponibles.
- **12.2 Persistencia y degradabilidad** No existen más datos relevantes disponibles.
- **12.3 Potencial de bioacumulación** No existen más datos relevantes disponibles.
- **12.4 Movilidad en el suelo** No existen más datos relevantes disponibles.
- **Indicaciones medioambientales adicionales:**
- **Indicaciones generales:** Por regla general, no es peligroso para el agua

(continua en página 5)

Ficha de datos de seguridad según 1907/2006/CE, Artículo 31

fecha de impresión 06.04.2017

Número de versión 1

Revisión: 06.04.2017

Nombre comercial: CARTOUCHE CO2

(continua en página 4)

- **12.5 Resultados de la valoración PBT y mPmB**
- **PBT:** No aplicable.
- **mPmB:** No aplicable.
- **12.6 Otros efectos adversos** No existen más datos relevantes disponibles.

SECCIÓN 13: Consideraciones relativas a la eliminación

- **13.1 Métodos para el tratamiento de residuos**
- **Recomendación:**



No debe desecharse con la basura doméstica. No debe llegar al alcantarillado.

- **Catálogo europeo de residuos**

16 00 00	RESIDUOS NO ESPECIFICADOS EN OTRO CAPÍTULO DE LA LISTA
16 05 00	Gases en recipientes a presión y productos químicos desechados
16 05 05	Gases en recipientes a presión, distintos de los especificados en el código 16 05 04

- **Embalajes sin limpiar:**
- **Recomendación:** Eliminar conforme a las disposiciones oficiales.
- **Producto de limpieza recomendado:** Agua, eventualmente añadiendo productos de limpieza.

SECCIÓN 14: Información relativa al transporte

- **14.1 Número ONU**
- **ADR, IMDG, IATA** UN1013
- **14.2 Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas**
- **ADR** UN1013 DIÓXIDO DE CARBONO
- **IMDG, IATA** CARBON DIOXIDE

- **14.3 Clase(s) de peligro para el transporte**

- **ADR**



- **Clase** 2 2A Gases
- **Etiqueta** 2.2

- **IMDG, IATA**



- **Class** 2.2
- **Label** 2.2

(continua en página 6)

Ficha de datos de seguridad
según 1907/2006/CE, Artículo 31

fecha de impresión 06.04.2017

Número de versión 1

Revisión: 06.04.2017

Nombre comercial: CARTOUCHE CO2

(continua en página 5)

· 14.4 Grupo de embalaje	
· ADR, IMDG, IATA	suprimido
· 14.5 Peligros para el medio ambiente:	
· Contaminante marino:	No
· 14.6 Precauciones particulares para los usuarios	Atención: Gases
· Número Kemler:	20
· Número EMS:	F-C,S-V
· Stowage Category	A
· 14.7 Transporte a granel con arreglo al anexo II del Convenio MARPOL y el Código IBC	No aplicable.
· Transporte/datos adicionales:	
· ADR	
· Cantidades limitadas (LQ)	120 ml
· Cantidades exceptuadas (EQ)	Código: E1 Cantidad neta máxima por envase interior: 30 ml Cantidad neta máxima por embalaje exterior: 1000 ml
· Categoría de transporte	2
· Código de restricción del túnel	C/E
· IMDG	
· Limited quantities (LQ)	120 ml
· Excepted quantities (EQ)	Code: E1 Maximum net quantity per inner packaging: 30 ml Maximum net quantity per outer packaging: 1000 ml
· "Reglamentación Modelo" de la UNECE:	UN 1013 DIÓXIDO DE CARBONO, 2.2

SECCIÓN 15: Información reglamentaria

- 15.1 Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla
- Directiva 2012/18/UE
- Sustancias peligrosas nominadas - ANEXO I No contiene la sustancia.
- 15.2 Evaluación de la seguridad química: Una evaluación de la seguridad química no se ha llevado a cabo.

SECCIÓN 16: Otra información

Los datos se fundan en el estado actual de nuestros conocimientos, pero no constituyen garantía alguna de cualidades del producto y no generan ninguna relación jurídica contractual.

· Abreviaturas y acrónimos:

RID: Règlement international concernant le transport des marchandises dangereuses par chemin de fer (Regulations Concerning the International Transport of Dangerous Goods by Rail)
ICAO: International Civil Aviation Organisation
ADR: Accord européen sur le transport des marchandises dangereuses par Route (European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road)
IMDG: International Maritime Code for Dangerous Goods
IATA: International Air Transport Association
GHS: Globally Harmonised System of Classification and Labelling of Chemicals
EINECS: European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances
VOC: Volatile Organic Compounds (USA, EU)
PBT: Persistent, Bioaccumulative and Toxic

(continua en página 7)

Ficha de datos de seguridad
según 1907/2006/CE, Artículo 31

fecha de impresión 06.04.2017

Número de versión 1

Revisión: 06.04.2017

Nombre comercial: CARTOUCHE CO2

SVHC: Substances of Very High Concern
vPvB: very Persistent and very Bioaccumulative
Press. Gas D: Gases a presión – Gas disuelto

(continua en página 6)

ES

ANEXO IV: CÓDIGO DE PRUEBA DEL SENSOR DE PRESIÓN HIDRÁULICO

```
const int analogInPin = A0; // Pin Analogico al que esta conectado
el sensor
    int sensorValue = 0; // Valor leído
    float psi = 0; // valor en PSI

void setup() {
    Serial.begin(9600); // inicializa comunicacion serial a 9600
baudios
}

void loop() {
    sensorValue = analogRead(analogInPin); //Lee el valor
analógico
    psi = (map(sensorValue, 102, 920, 0, 17400))/100.0; //Calcula
los psi

    //Imprime los resultados por monitor serial:

    Serial.print("Valor ADC = ");

    Serial.print(sensorValue);

    Serial.print("\t psi = ");

    Serial.println(psi);

    delay(50); //retardo
}
```

ANEXO V: CÓDIGO DE PRUEBA DE ELECTROVÁLVULAS HIDRÁULICAS

```
int in1 = 7;
int in2 = 8;

void setup() {

    pinMode(in1, OUTPUT);

    digitalWrite(in1, HIGH);

    pinMode(in2, OUTPUT);

    digitalWrite(in2, HIGH);
}

void loop() {

    digitalWrite(in1, LOW);
    delay(1500);

    digitalWrite(in1, HIGH);
    delay(1500);

    digitalWrite(in2, LOW);
    delay(1500);

    digitalWrite(in2, HIGH);
    delay(1500);
}
```

ANEXO VI: CÓDIGO DE PRUEBA DEL SISTEMA HIDRÁULICO

```
int state = 0; /* 0:stop; 1:in; 2:out */
int in_water_valve = 7;
int out_water_valve = 8;
String command;

const int watter_sensor_pin = A0; // Pin Analogico al que esta
conectado el sensor

int watter_sensor_value = 0; // Valor leído

float watter_sensor_psi = 0; // valor en PSI

int num_cicles = 0;

void setup() {
    // Initialize serial port

    Serial.begin(57600);
    Serial.println(".....");
    pinMode(in_water_valve, OUTPUT);
    pinMode(out_water_valve, OUTPUT);
}

void loop() {
    /* Read sensor and writ to serial console every 10 loops */
    if (num_cicles % 10 == 0) {

        watter_sensor_value = analogRead(watter_sensor_pin); //Lee el
valor analogico
        watter_sensor_psi = (map(watter_sensor_value, 102, 920, 0,
17400))/100.0; //Calcula los psi
        Serial.println(watter_sensor_psi);
        num_cicles = 0;

    }else{
        num_cicles = num_cicles + 1;
    }

    /* Read command */

    if (Serial.available()) {
```

```
    command = Serial.readStringUntil('\n');
    command.trim();
    Serial.println(".....");
    Serial.println("Comand received : " + command);
    Serial.println(".....");
}else{

    command = "";
}

/* Check state */

if (state == 0){ /*stop*/
    if (command.equals("in")){
        state = 1;
        Serial.println("Actual state : " + (String) state);

        /* Activación valvula entrada */
        digitalWrite(in_water_valve, HIGH);

        /* Desactivación valvula salida */
        digitalWrite(out_water_valve, LOW);

    }else if(command.equals("out")){

        state = 2;
        Serial.println("Actual state : " + (String) state);
        /* Activación valvula entrada */
        digitalWrite(in_water_valve, LOW);

        /* Desactivación valvula salida */
        digitalWrite(out_water_valve, HIGH);
    }
}else if(state == 1){ /*in*/
    if (command.equals("stop")){
        state = 0;
        Serial.println("Actual state : " + (String) state);
        digitalWrite(in_water_valve, LOW);
        digitalWrite(out_water_valve, LOW);
    }
}

}else if(state == 2){ /*out*/
    if (command.equals("stop")){
        state = 0;
        Serial.println("Actual state : " + (String) state);
        digitalWrite(in_water_valve, LOW);
        digitalWrite(out_water_valve, LOW);
    }
}
}
delay(1);
}
```

ANEXO VII: CÓDIGO DE PRUEBA DEL SENSOR DE PRESIÓN NEUMÁTICA

```
const int analogInPin = A1; // Pin Analogico al que esta conectado
el sensor

int sensorValue = 0; // Valor leído
float pressure = 0; // valor en PSI
float voltage = 0; // Voltage leído

void setup() {
    Serial.begin(9600); // inicializa comunicacion serial a 9600
    baudios
}

void loop() {

    sensorValue = analogRead(analogInPin); //Lee el valor analogico
    voltage = (sensorValue / 1023.0) * 5.0; // Convert the sensor
    value to voltage (0V to 5V)

    // Map the voltage to pressure (0.5V to 4.5V to 0 psi to 30 psi)
    pressure = map(voltage * 1000, 500, 4500, 0, 30); // Multiply
    voltage by 1000 to handle 0.5V - 4.5V range

    // Print the values to the Serial Monitor

    Serial.print("Voltage: ");
    Serial.print(voltage);
    Serial.print("V, Pressure: ");
    Serial.print(pressure);
    Serial.println(" psi");
    delay(50); //retardo
}
```

ANEXO VIII: CÓDIGO DE PRUEBA DE VÁLVULAS DEL SISTEMA NEUMÁTICO

```
out_air_valve, HIGH);

int in_air_valve = 12;
int out_air_valve = 13;
int state = 0;

void setup() {
  // Initialize serial port
  Serial.begin(9600);
  pinMode(in_air_valve, OUTPUT);
  pinMode(out_air_valve, OUTPUT);
}

void loop() {

  /* Check state */
  Serial.println("Actual state : " + (String) state);
  if (state == 0){

    /* Activación valvula entrada */
    digitalWrite(in_air_valve, HIGH);

    /* Desactivación valvula salida */
    digitalWrite(out_air_valve, LOW);
    state = 1;

  }else if(state == 1){
    /* Activación valvula salida */
    digitalWrite(out_air_valve, HIGH);
    /* Desactivación valvula entrada */
    digitalWrite(in_air_valve, LOW);
    state = 0;
  }
  delay(1000);
}
```

ANEXO IX: CÓDIGO DE PRUEBA DEL SISTEMA NEUMÁTICO

```
int state = 0; /* 0:stop; 1:in; 2:out */
int in_air_valve = 12;
int out_air_valve = 13;

const int air_sensor_pin = A1; // Pin analógico del sensor de
presión de aire
int air_sensor_value = 0;      // Valor leído
float air_sensor_psi = 0;      // Valor en PSI

String command;
int num_cycles = 0;

void setup() {
  Serial.begin(57600);
  Serial.println("Sistema de válvulas de aire iniciado...");

  pinMode(in_air_valve, OUTPUT);
  pinMode(out_air_valve, OUTPUT);
}

void loop() {
  // Lectura del sensor cada 10 ciclos

  if (num_cycles % 10 == 0) {
    air_sensor_value = analogRead(air_sensor_pin); // Leer valor
    analógico
    air_sensor_psi = (map(air_sensor_value, 102, 920, 0, 17400)) /
100.0; // Convertir a PSI
    Serial.print("Presión (PSI): ");
    Serial.println(air_sensor_psi);
    num_cycles = 0;
  } else {
    num_cycles++;
  }

  // Lectura de comandos por puerto serie

  if (Serial.available()) {

    command = Serial.readStringUntil('\n');
    command.trim();
    Serial.println("-----");
    Serial.println("Comando recibido: " + command);
    Serial.println("-----");
  } else {
    command = "";
  }
}
```

```
}

// Gestión de estados
if (state == 0) { // Estado: STOP
    if (command.equals("in")) {

        state = 1;
        Serial.println("Estado actual: " + (String)state);
        digitalWrite(in_air_valve, HIGH);
        digitalWrite(out_air_valve, LOW);
    } else if (command.equals("out")) {

        state = 2;
        Serial.println("Estado actual: " + (String)state);
        digitalWrite(in_air_valve, LOW);
        digitalWrite(out_air_valve, HIGH);
    }

} else if (state == 1) { // Estado: IN

    if (command.equals("stop")) {
        state = 0;
        Serial.println("Estado actual: " + (String)state);
        digitalWrite(in_air_valve, LOW);
        digitalWrite(out_air_valve, LOW);
    }

} else if (state == 2) { // Estado: OUT

    if (command.equals("stop")) {
        state = 0;
        Serial.println("Estado actual: " + (String)state);
        digitalWrite(in_air_valve, LOW);
        digitalWrite(out_air_valve, LOW);
    }

}

delay(1); // Pequeña pausa
}
```

ANEXO X: CÓDIGO DEL SISTEMA DE MÓDULO DE LASTRE

```
int state = 0; /* 0:stop; 1:in; 2:out */
int in_water_valve = 7;
int out_water_valve = 8;
int in_air_valve = 12;
int out_air_valve = 13;

const int watter_sensor_pin = A0; // Pin Analógico al que está
conectado el sensor
int watter_sensor_value = 0; // Valor leído
float watter_sensor_psi = 0; // valor en PSI
int num_cicles = 0;

const int air_sensor_pin = A1; // Pin Analogico al que está
conectado el sensor
int air_sensor_value = 0; // Valor leído
float air_sensor_voltage = 0; // Voltage leído
float air_sensor_psi = 0; // Presión leído

String command;
void setup() {

    // Initialize serial port
    Serial.begin(9600);
    Serial.println(".....");
    pinMode(in_water_valve, OUTPUT);
    pinMode(out_water_valve, OUTPUT);
    pinMode(in_air_valve, OUTPUT);
    pinMode(out_air_valve, OUTPUT);
}

void loop() {

    /* Read sensors and write to serial console every 10 loops */
    if (num_cicles % 10 == 0) {
        //////////////////////////////////// WATER ////////////////////////////////////
        watter_sensor_value = analogRead(watter_sensor_pin); //Lee el
valor analogico
        watter_sensor_psi = (map(watter_sensor_value, 102, 920, 0,
17400))/100.0; //Calcula los psi

        //////////////////////////////////// AIR ////////////////////////////////////
        air_sensor_value = analogRead(watter_sensor_pin); //Lee el valor
analogico
        air_sensor_voltage = (air_sensor_value / 1023.0) * 5.0; //
Convert the sensor value to voltage (0V to 5V)
        // Map the voltage to pressure (0.5V to 4.5V to 0 psi to 30 psi)
        air_sensor_psi = map(air_sensor_voltage * 1000, 500, 4500, 0,
30); // Multiply voltage by 1000 to handle 0.5V - 4.5V range
```

```
    Serial.println(String(watter_sensor_psi) + ',' +
String(air_sensor_psi));
    num_cicles = 0;
}else{

    num_cicles = num_cicles + 1;
}
/* Read command */
if (Serial.available()) {
    command = Serial.readStringUntil('\n');
    command.trim();
    //Serial.println(".....");
    //Serial.println("Comand received : " + command);
    //Serial.println(".....");
}else{

    command = "";
}

/* Check state */

if (state == 0){ /*stop*/
    if (command.equals("in")){
        state = 1;
        //Serial.println("Actual state : " + (String) state);

        /* Activación valvula entrada agua */
        digitalWrite(in_water_valve, HIGH);

        /* Desactivación valvula salida agua */
        digitalWrite(out_water_valve, LOW);

        /* Desactivación valvula entrada aire */
        digitalWrite(in_air_valve, LOW);

        /* Activación valvula salida aire*/
        digitalWrite(out_air_valve, HIGH);

    }else if(command.equals("out")){
        state = 2;
        //Serial.println("Actual state : " + (String) state);

        /* Desactivación valvula entrada */
        digitalWrite(in_water_valve, LOW);

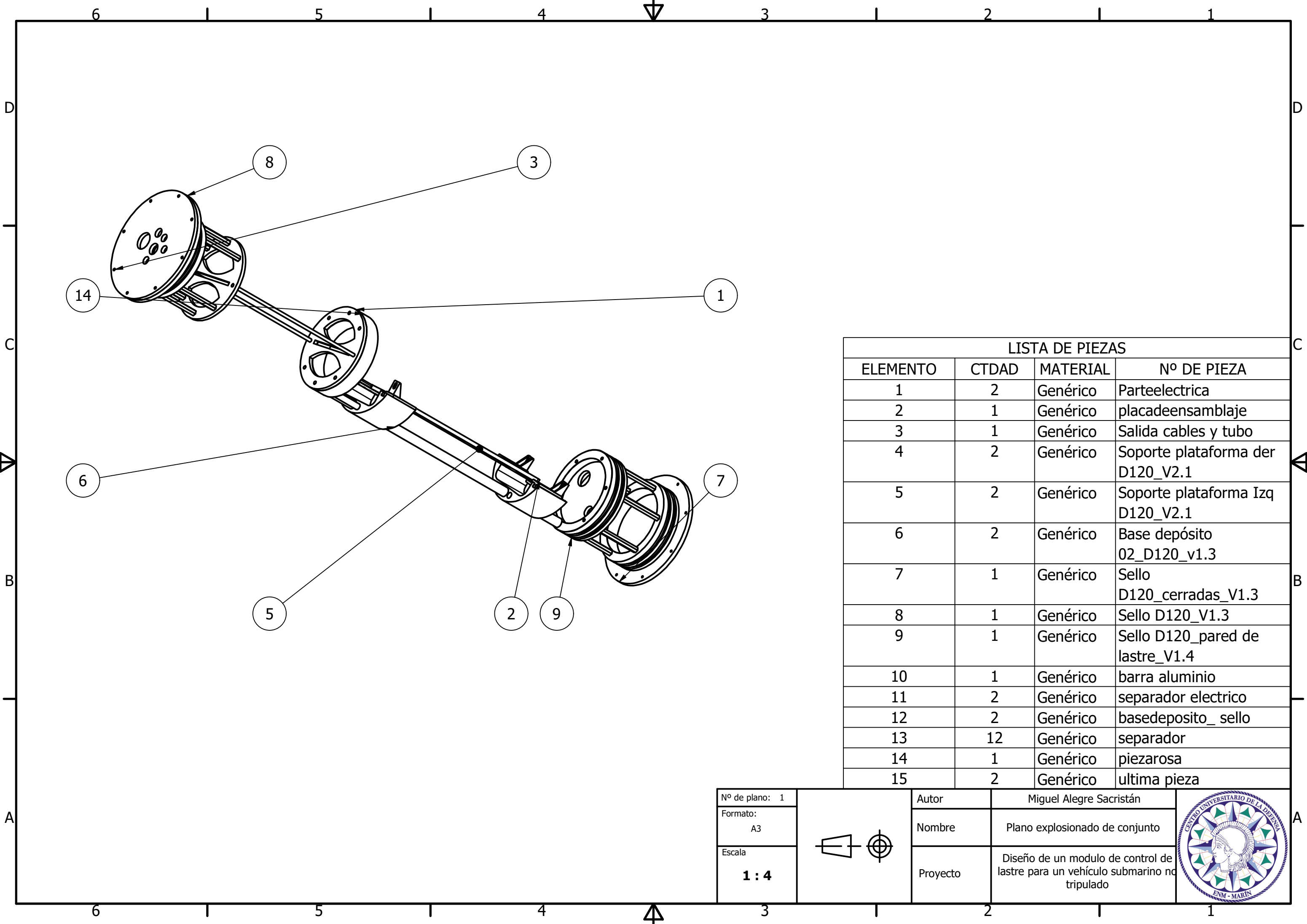
        /* Activación valvula salida */
        digitalWrite(out_water_valve, HIGH);

        /* Activa valvula entrada aire */
        digitalWrite(in_air_valve, HIGH);
    }
}
```

```
        /* Desactivación valvula salida aire*/
        digitalWrite(out_air_valve, LOW);

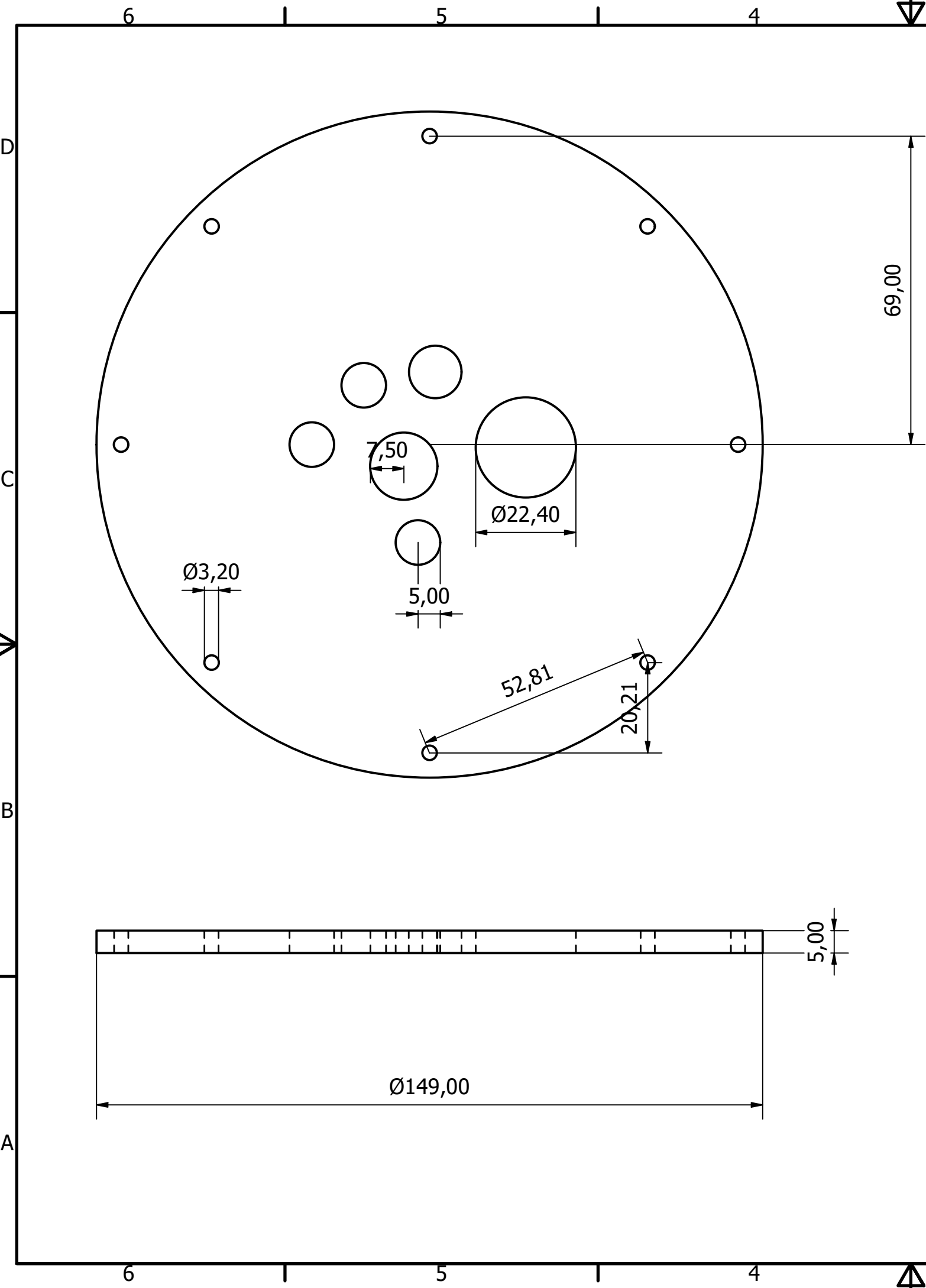
    }
} else if(state == 1){ /*in*/
    if (command.equals("stop")){
        state = 0;
        //Serial.println("Actual state : " + (String) state);
        digitalWrite(in_water_valve, LOW);
        digitalWrite(out_water_valve, LOW);
        digitalWrite(in_air_valve, LOW);
        digitalWrite(out_air_valve, LOW);
    }
} else if(state == 2){ /*out*/
    if (command.equals("stop")){
        state = 0;
        //Serial.println("Actual state : " + (String) state);
        digitalWrite(in_water_valve, LOW);
        digitalWrite(out_water_valve, LOW);
        digitalWrite(in_air_valve, LOW);
        digitalWrite(out_air_valve, LOW);
    }
}
}
```

ANEXO XI: PLANOS

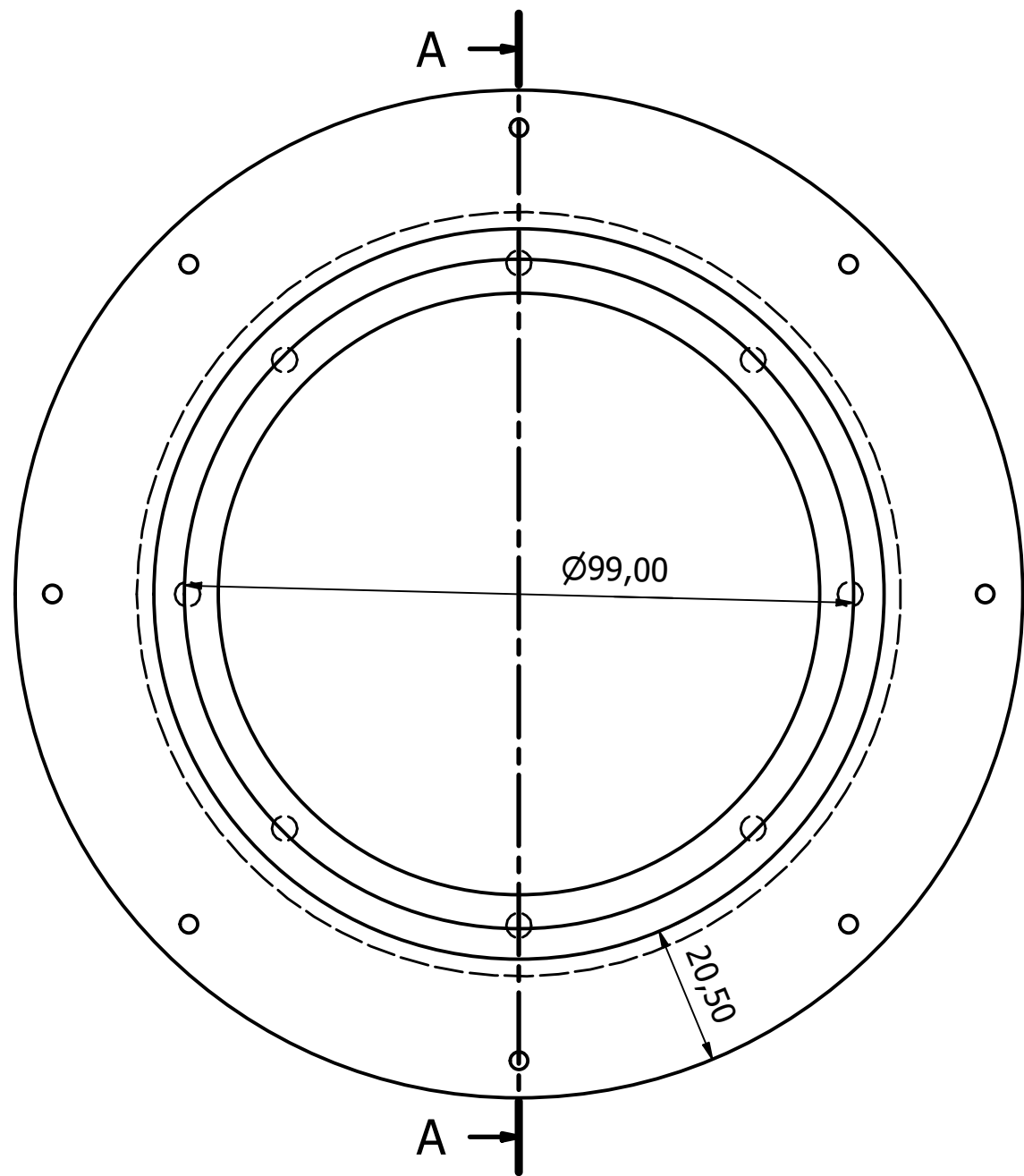


LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	MATERIAL	Nº DE PIEZA
1	2	Genérico	Parte electrica
2	1	Genérico	placa de ensamble
3	1	Genérico	Salida cables y tubo
4	2	Genérico	Soporte plataforma der D120_V2.1
5	2	Genérico	Soporte plataforma Izq D120_V2.1
6	2	Genérico	Base depósito 02_D120_v1.3
7	1	Genérico	Sello D120_cerradas_V1.3
8	1	Genérico	Sello D120_V1.3
9	1	Genérico	Sello D120_pared de lastre_V1.4
10	1	Genérico	barra aluminio
11	2	Genérico	separador electrico
12	2	Genérico	base de deposito_ sello
13	12	Genérico	separador
14	1	Genérico	pieza rosa
15	2	Genérico	ultima pieza

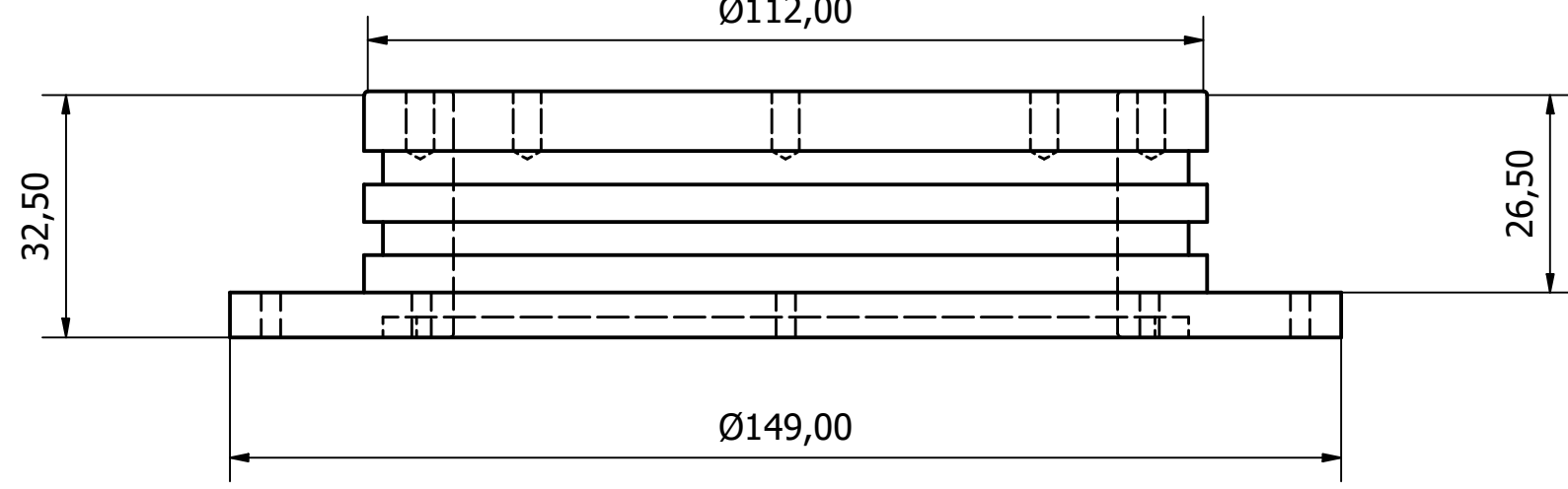
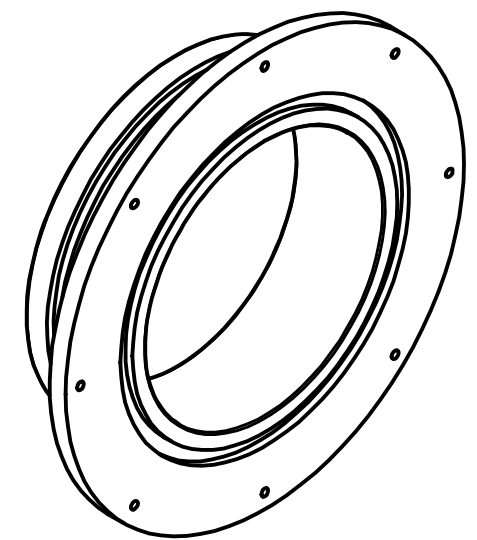
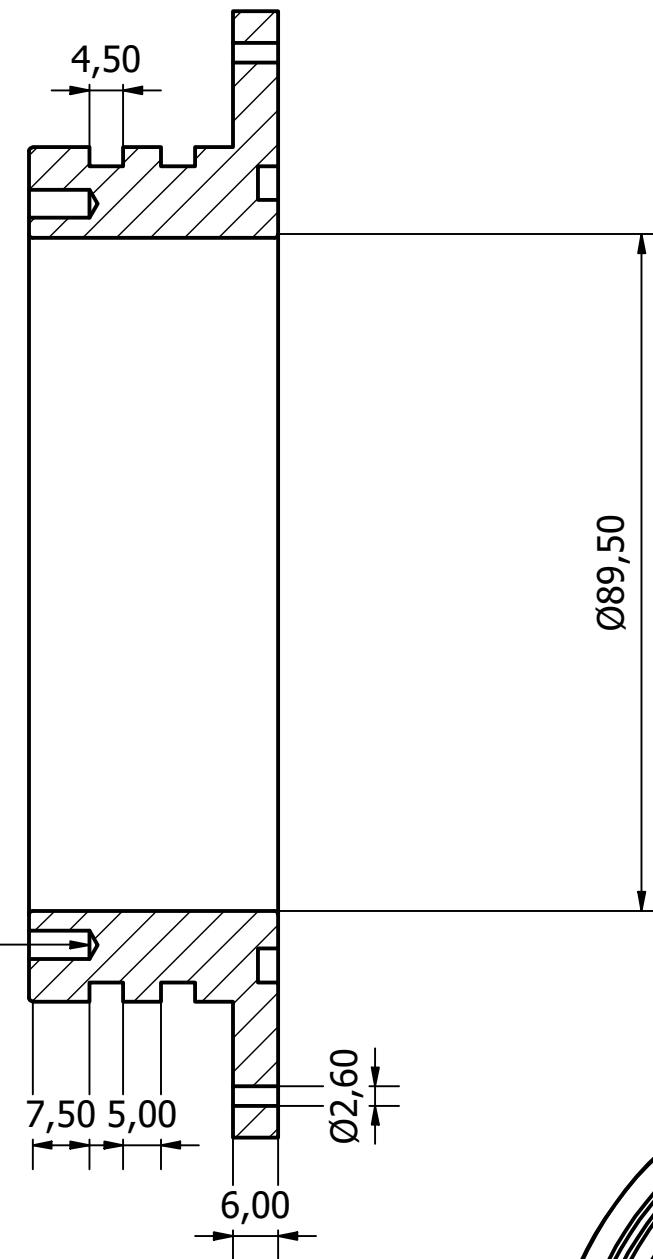
Nº de plano: 1		Autor	Miguel Alegre Sacristán	
Formato: A3		Nombre	Plano explosionado de conjunto	
Escala: 1 : 4		Proyecto	Diseño de un modulo de control de lastre para un vehículo submarino no tripulado	



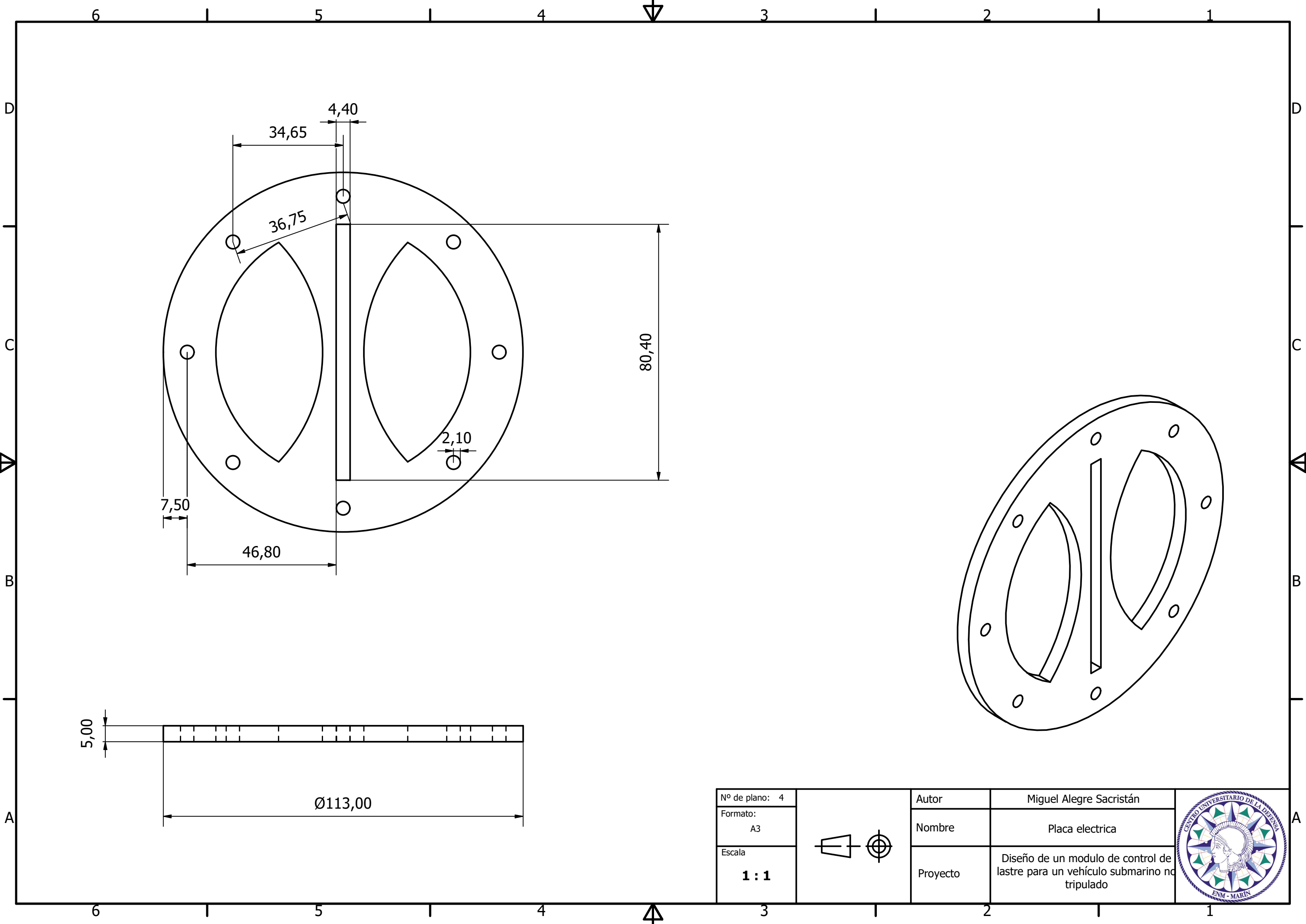
Nº de plano: 2		Autor	Miguel Alegre Sacristán	
Formato: A3		Nombre	placa de comunicación	
Escala: 1 : 1		Proyecto	Diseño de un modulo de control de lastre para un vehículo submarino no tripulado	

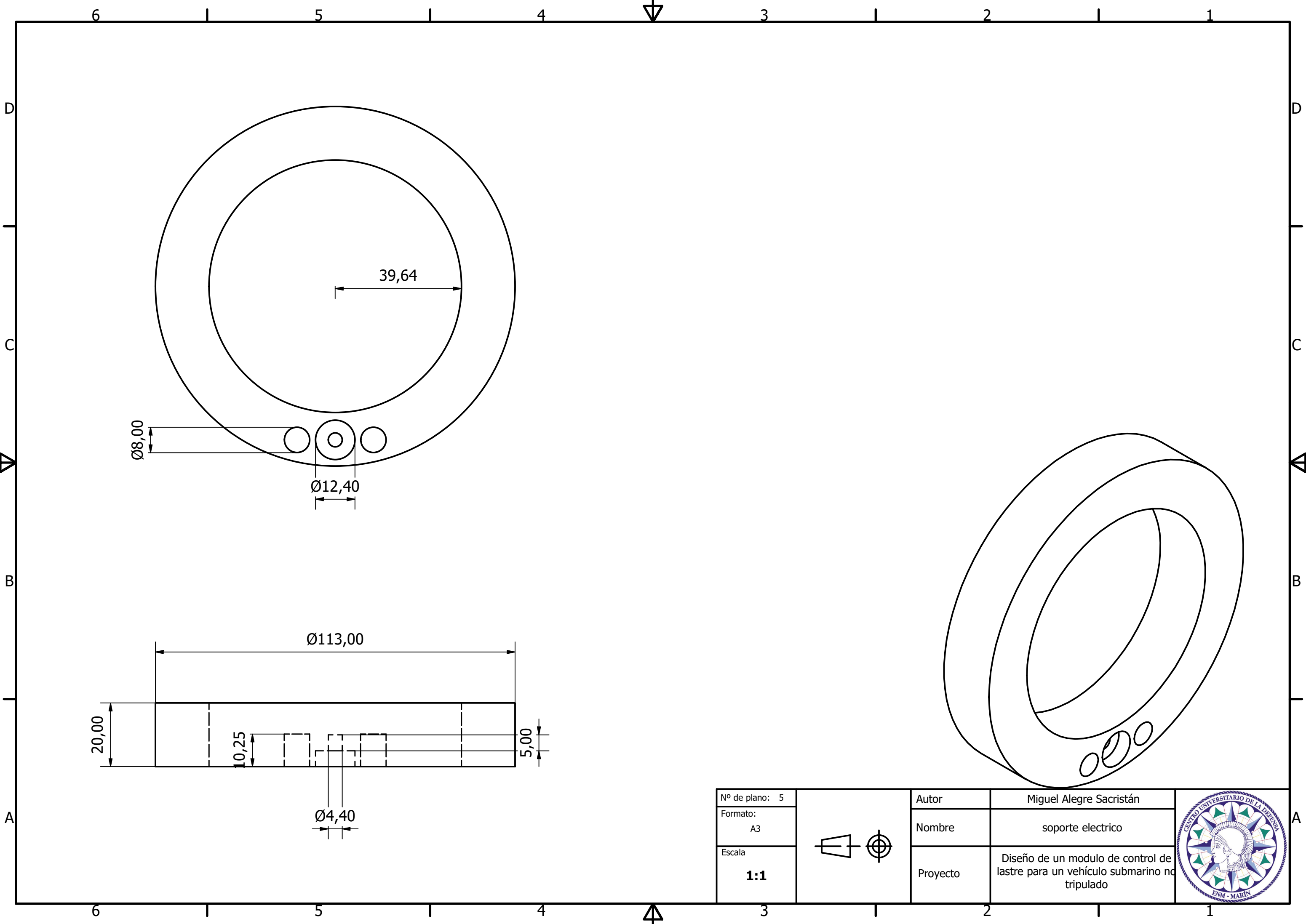


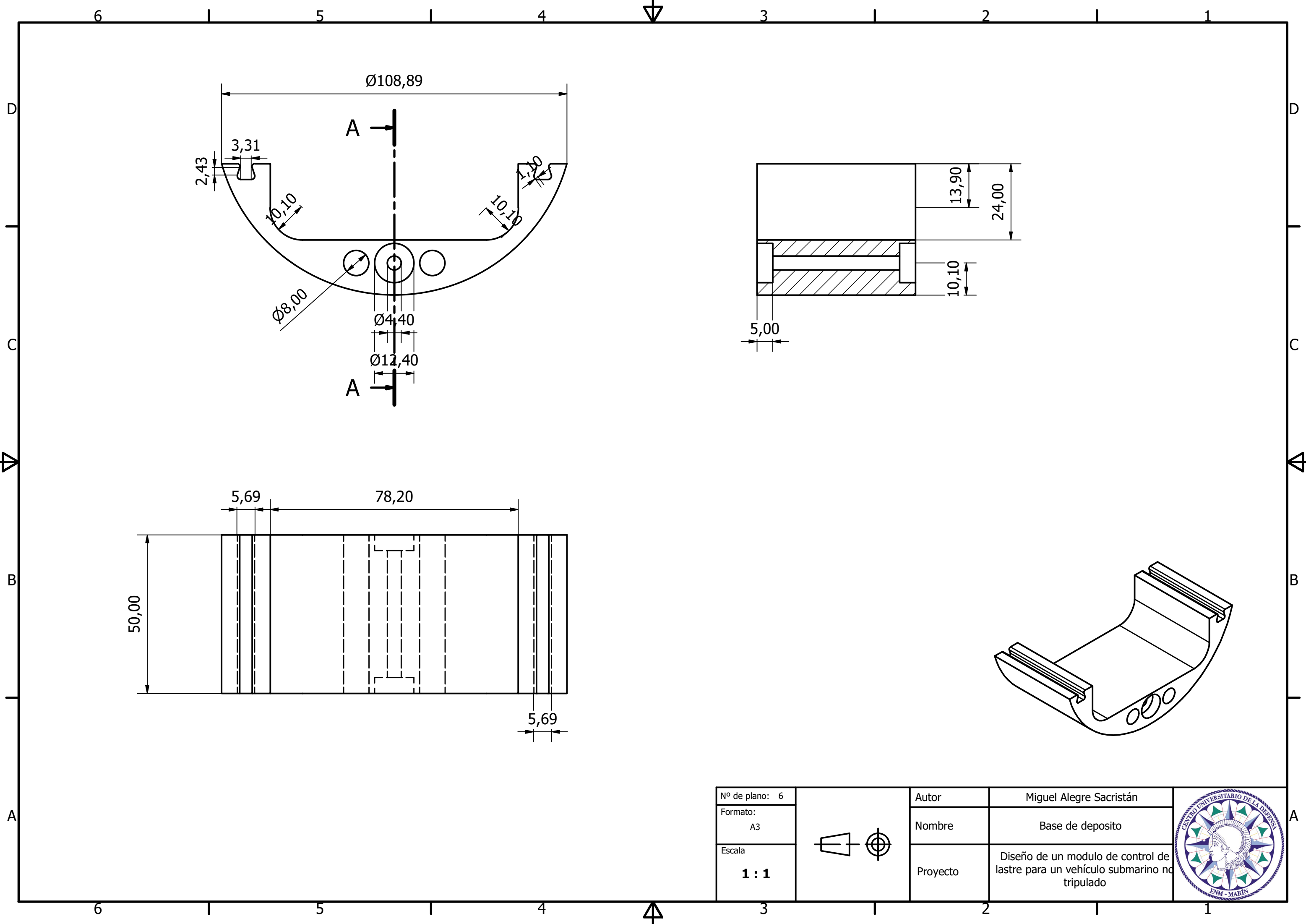
$\varnothing 3,70$ -8,00 Profundidad

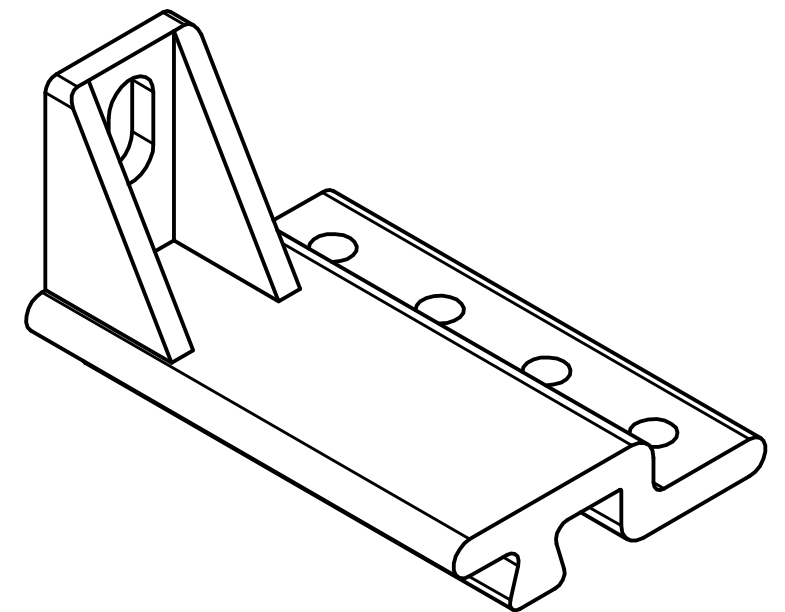
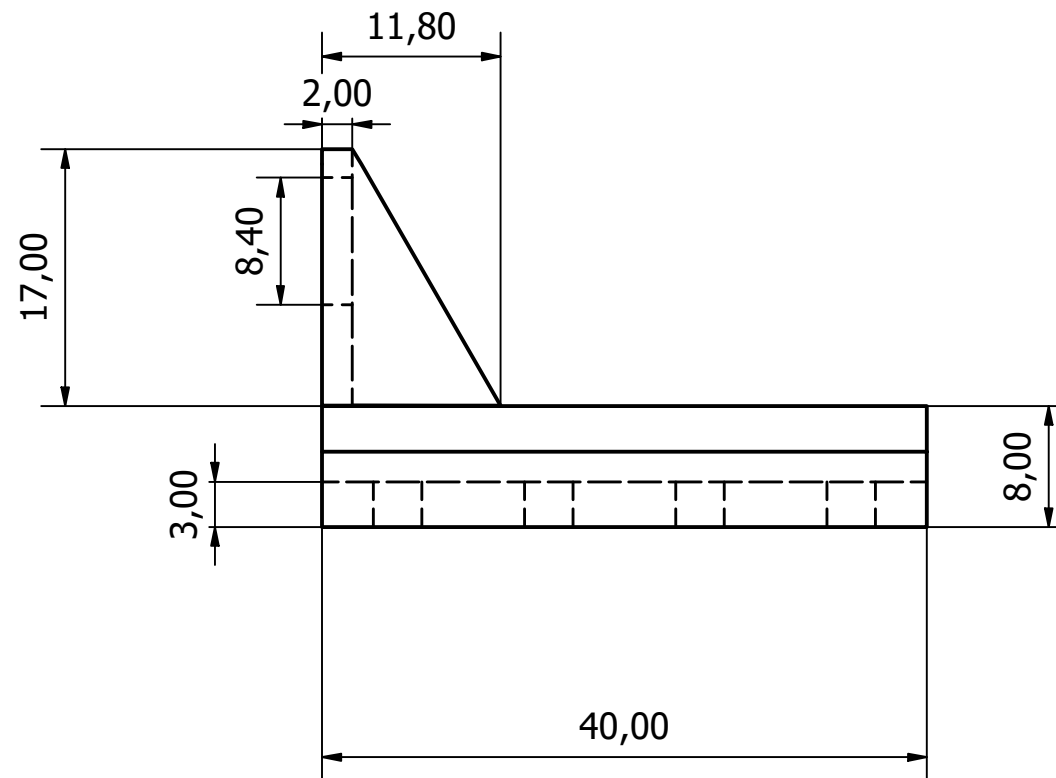
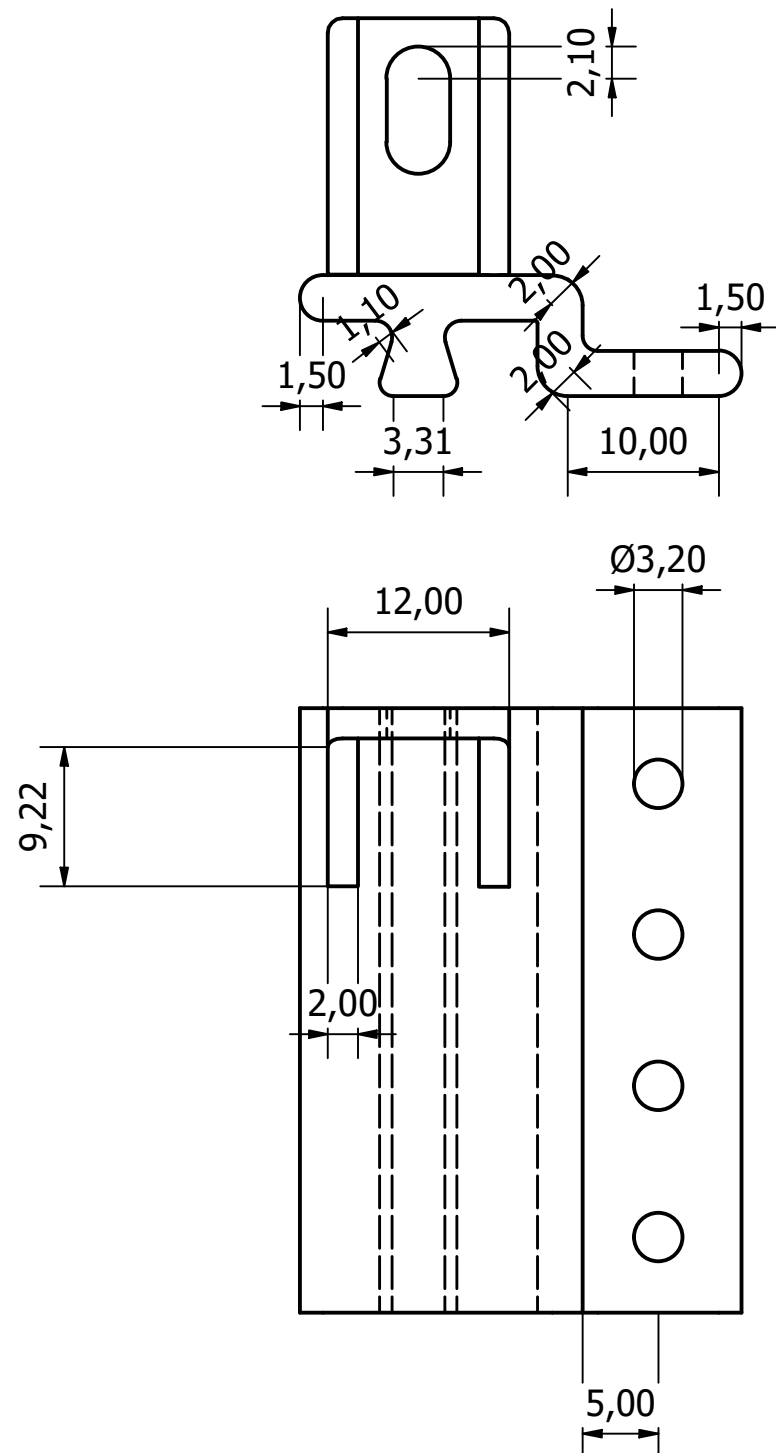


Nº de plano: 3		Autor	Miguel Alegre Sacristán	
Formato: A3		Nombre	Tapa abierta	
Escala: 1 : 1		Proyecto	Diseño de un modulo de control de lastre para un vehiculo submarino no tripulado	

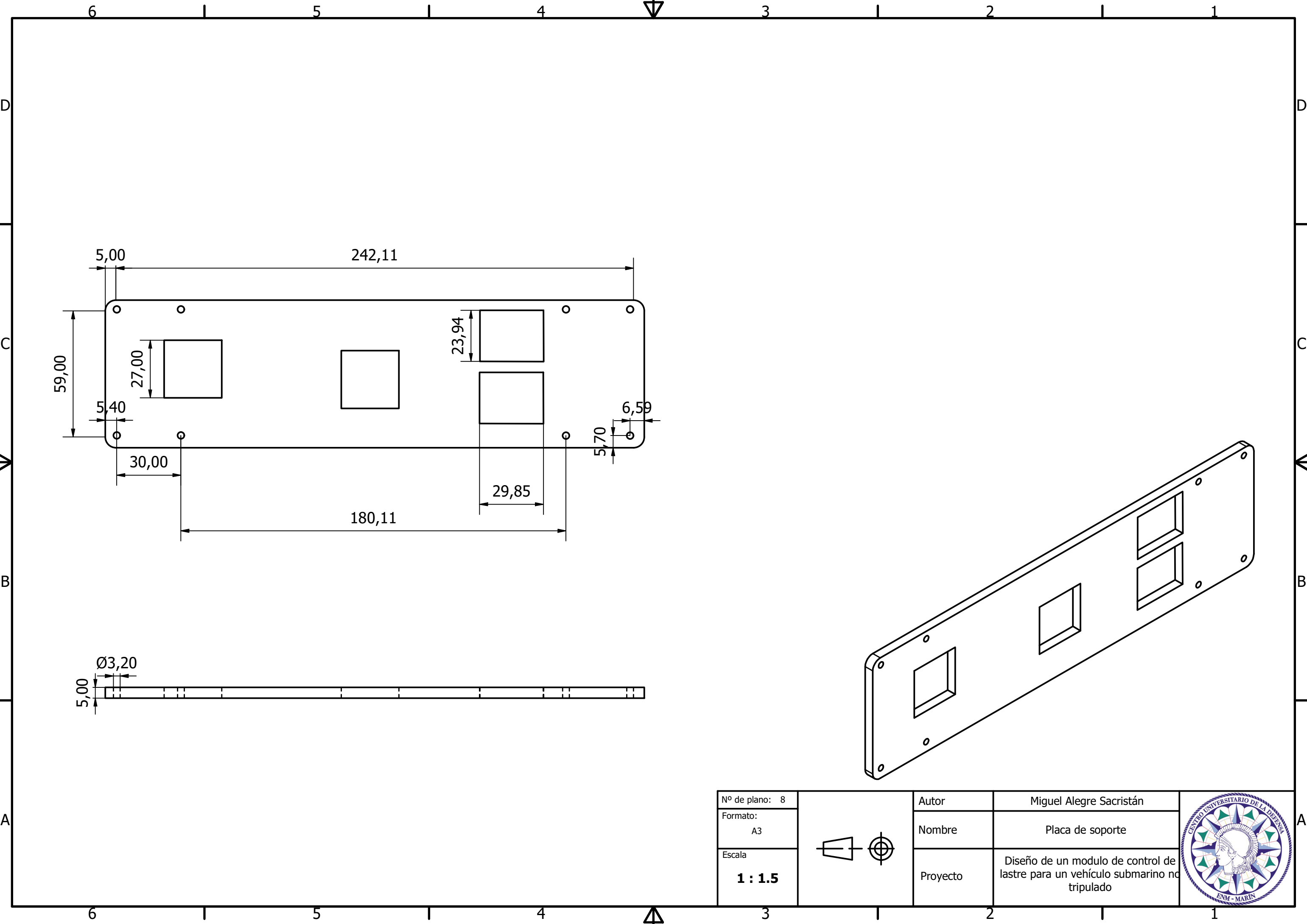


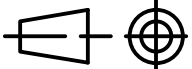


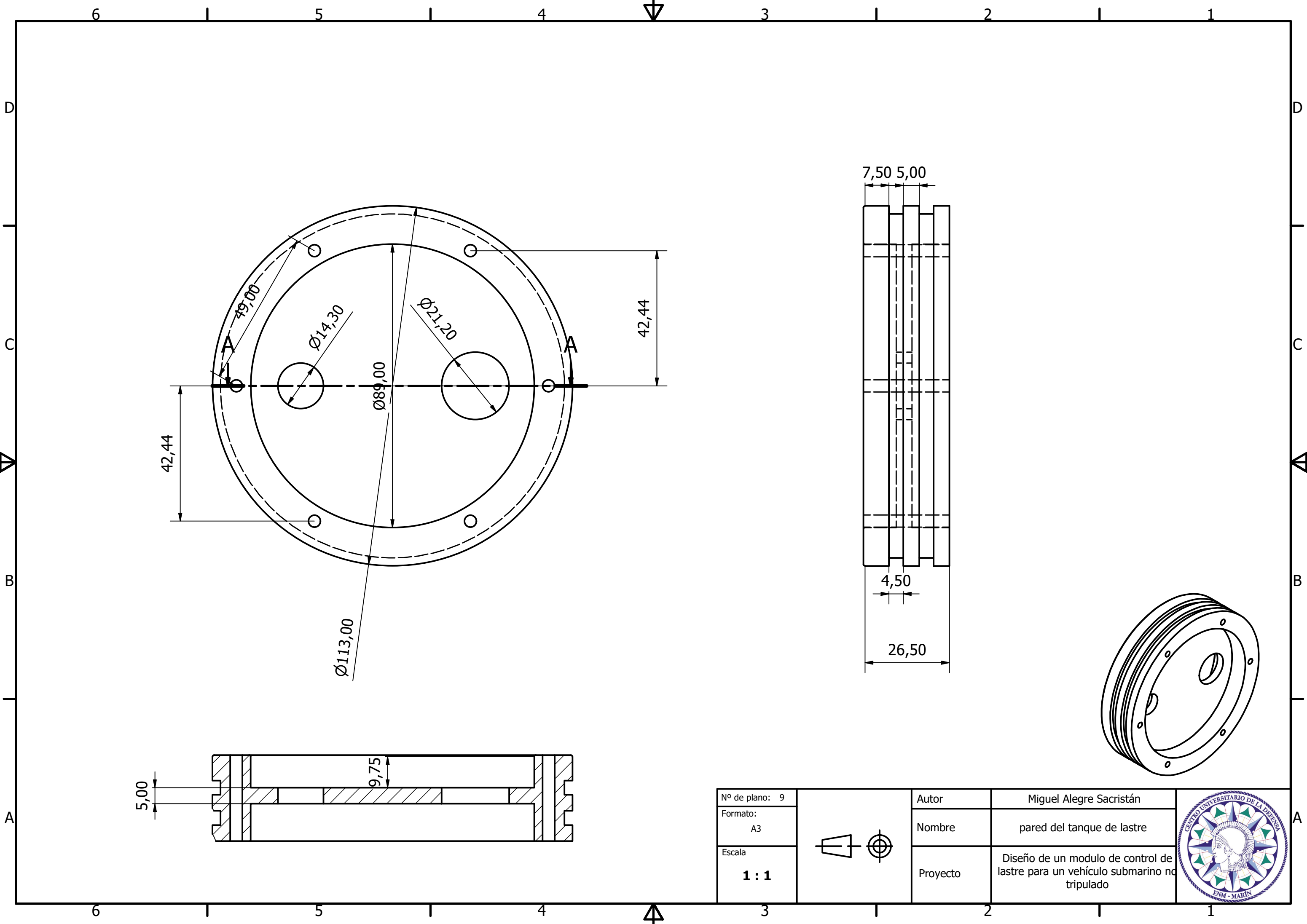




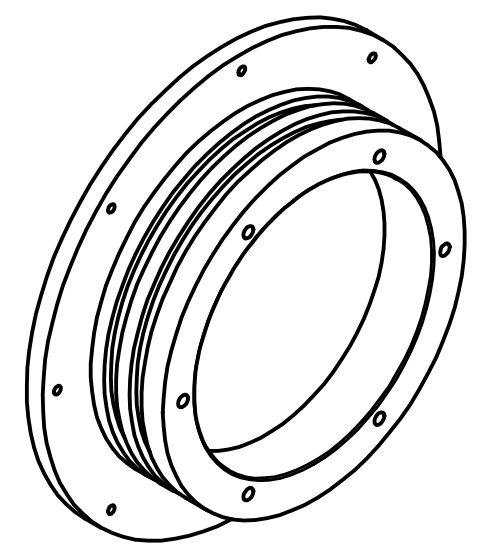
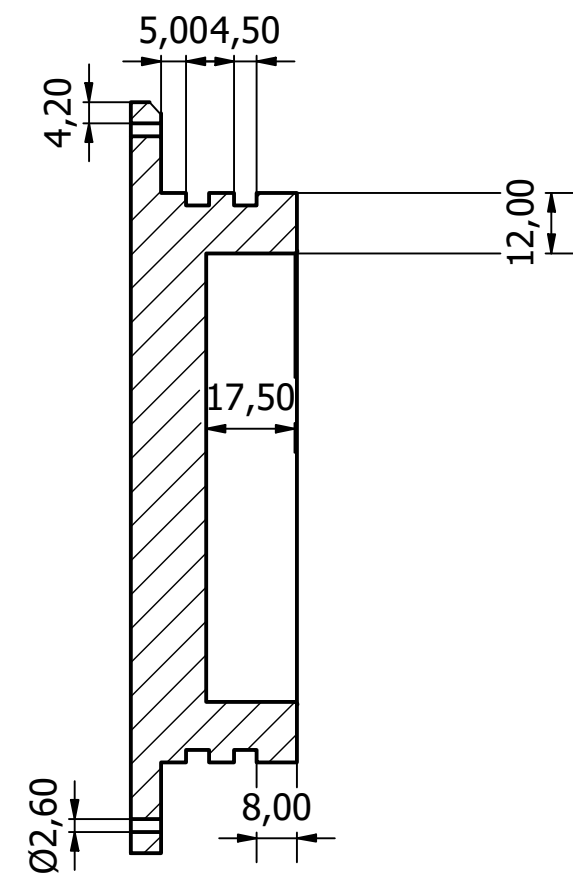
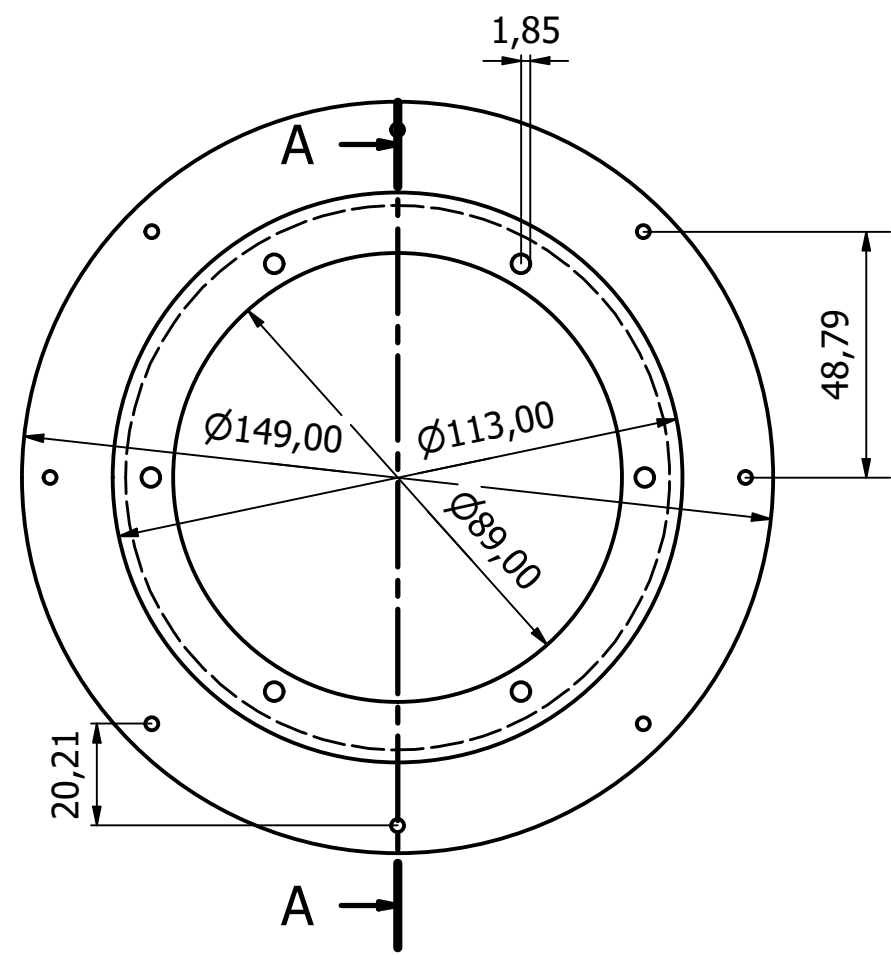
Nº de plano: 7		Autor	Miguel Alegre Sacristán	
Formato: A3		Nombre	soporte de placa	
Escala 2 : 1		Proyecto	Diseño de un modulo de control de lastre para un vehículo submarino no tripulado	
3	1	2	1	A



Nº de plano: 8		Autor	Miguel Alegre Sacristán	
Formato: A3		Nombre	Placa de soporte	
Escala: 1 : 1.5		Proyecto	Diseño de un modulo de control de lastre para un vehículo submarino no tripulado	



Nº de plano: 9		Autor	Miguel Alegre Sacristán	
Formato: A3		Nombre	pared del tanque de lastre	
Escala: 1 : 1		Proyecto	Diseño de un modulo de control de lastre para un vehiculo submarino no tripulado	



Nº de plano: 10		Autor	Miguel Alegre Sacristán	
Formato: A3		Nombre	Tapa de sellado	
Escala: 1 : 1.5		Proyecto	Diseño de un modulo de control de lastre para un vehículo submarino no tripulado	

D

C

B

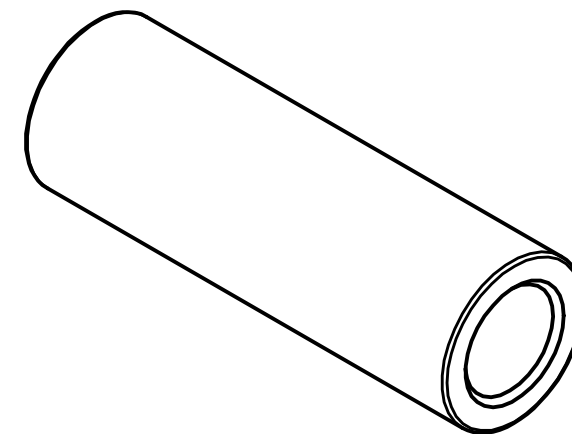
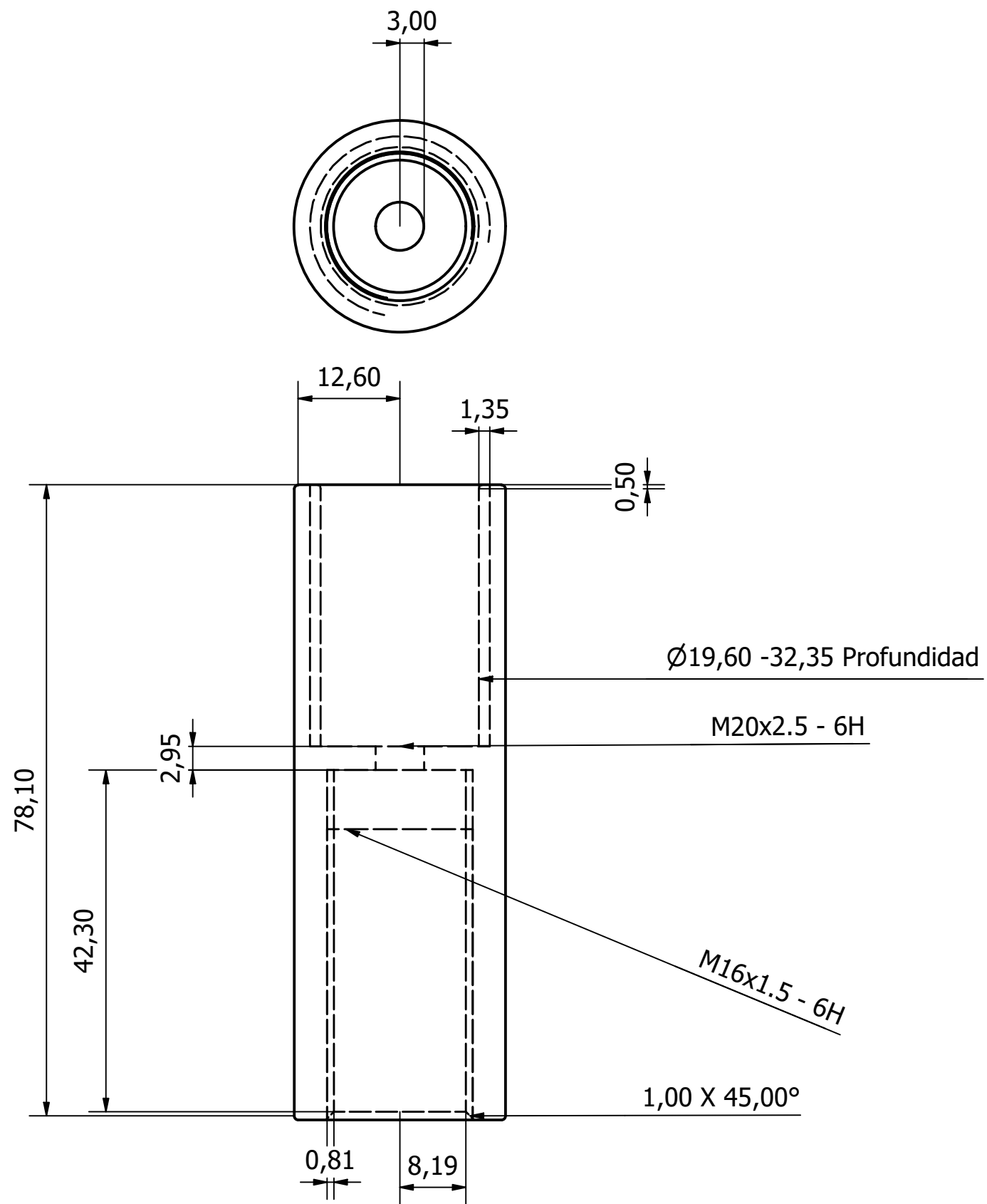
A

D

C

B

A



Nº de plano: 11		Autor	Miguel Alegre Sacristán	
Formato: A3		Nombre	Acople de botella de CO2	
Escala: 1.5:1		Proyecto	Diseño de un modulo de control de lastre para un vehículo submarino no tripulado	