



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Modelo paramétrico de calibración de un módulo de control de
orientación en un AUV*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Fernando Núñez Gómez

DIRECTORES: Carlos Pérez Collazo
Antón Cacabelos Reyes

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Modelo paramétrico de calibración de un módulo de control de
orientación en un AUV*

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General / Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

A raíz de la Revolución Tecnológica 4.0, uno de los cambios más significativos que ha experimentado la guerra es la implementación de vehículos autónomos con fines bélicos. Como se puede apreciar en numerosos conflictos de la actualidad, la ventaja táctica proporcionada por la implementación de estos vehículos, puede ser un factor determinante para decidir un enfrentamiento. Uno de los ejemplos más destacados es el *Glider*, un autómatas capacitado para cumplir una amplia variedad de misiones mientras planea por el fondo marino haciendo un consumo de energía mínimo. Este desplazamiento se produce mediante la variación de flotabilidad, provocando un movimiento vertical y una inclinación, que, por medio de unas alas laterales se convierten en movimiento horizontal. Este trabajo plantea la elaboración de un modelo paramétrico de calibración de un módulo de control de un *Glider* modular, mediante un péndulo mecánico. Para ello se llevaron a cabo numerosos ensayos, con el fin de validar metodologías numéricas y gráficas existentes para obtención del centro de gravedad, así como los momentos de inercia del prototipo para las diferentes posiciones de la masa del módulo de control. Finalmente, como resultado de este periodo de estudio, se definió la componente longitudinal del modelo paramétrico.

PALABRAS CLAVE

Glider modular, Vehículo autónomo, Péndulo bifilar mecánico, Big data

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer, en especial, a mis tutores en este trabajo, Don Carlos Pérez Collazo y Don Antón Cacabelos Reyes, que con dedicación y paciencia han sabido guiarme para sacar adelante este proyecto e introducirme en el mundo de los vehículos autónomos submarinos. Me gustaría también referirme a los profesores del Centro Universitario de la Defensa, Don Guillermo Lareo Calviño y Don Jose Antonio González Prieto, por asistirme en el transcurso del proyecto en todas las etapas vinculantes a los materiales y metodología a emplear.

Por último, me gustaría agradecer a la Escuela Naval Militar y a la Armada por brindarme tantas oportunidades y ejemplos entorno a los que formarme y crecer como militar, además de fomentar y facilitarme el descubrir e indagar en temas relacionados con la carrera de las armas, como es el tema tratado en este proyecto de fin de grado.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas	6
1 Introducción y objetivos	8
1.1 Objetivos	10
1.2 Estructura del trabajo	11
2 Estado del arte	12
2.1 La guerra y acústica submarinas	12
2.2 Vehículos autónomos	16
2.3 Vehículos autónomos submarinos	19
2.4 El Glider	23
2.4.1 Concepto del Glider	23
2.4.2 Principio de funcionamiento	24
2.4.2.1 Energía, potencia y propulsión	26
2.4.2.2 Navegación, control y comunicaciones	27
2.4.3 Cuerpo de un Glider	27
2.4.4 Características y atributos	28
3 MATERIALES Y MÉTODOS	32
3.1 Materiales	32
3.1.1 Soporte del cilindro	32
3.1.2 Soporte principal de aluminio	33
3.1.3 Fondo cromado	34
3.1.4 Material de extrusión	34
3.1.5 Sistema de péndulo	35
3.1.6 Sistema de pesos calibrados	35
3.1.7 Cortadora láser LP1060	36
3.1.8 Impresora 3D Ultimaker 3	36
3.1.9 Cámara Logitech Carl Zeiss Tessar 1080p	37
3.1.10 Acelerómetro WT901blecl5.0	38
3.2 Software empleado	39
3.2.1 Autodesk	39
3.2.1.1 AutoCAD	39
3.2.1.2 Inventor	40

3.2.2 RDWorksV8	41
3.2.3 Ultimaker Cura	41
3.2.4 Bosch Rexroth MTpro64	42
3.2.5 Logitech Capture	42
3.2.6 Tracker	43
3.2.7 WitMotion.exe	44
3.2.8 Matlab/Octave	44
3.3 Procesado de datos	45
3.3.1 Obtención del centro de gravedad	46
3.3.2 Obtención del momento de inercia	49
3.3.2.1 Momento de inercia en los ejes x e y	49
3.3.2.2 Momento de inercia en el eje z	52
3.4 Diagrama de flujo	53
4 Resultados	54
4.1 Obtención del centro de gravedad	54
4.1.1 Centro de gravedad en x	54
4.1.1.1 Prueba de validación	54
4.1.1.2 Resultado final	54
4.1.2 Centro de gravedad en y	56
4.1.2.1 Prueba de validación	56
4.1.2.2 Resultado final	56
4.2 Obtención del momento de inercia	57
4.2.1 Prueba de validación	57
4.2.2 Cálculo teórico de errores	57
4.2.3 Resultado final	58
4.2.3.1 Momento de inercia en x	58
4.2.3.2 Momento de inercia en y	59
4.2.3.3 Momento de inercia en z	60
4.3 Corrección de pesos	61
4.4 Regulación de la flotabilidad neutra	63
5 Conclusiones y líneas futuras	65
5.1 Conclusiones	65
5.2 Líneas futuras	66
6 Bibliografía	67
Anexo I: Implicaciones éticas	70

Anexo II: Presupuesto	71
Costes fijos	71
Hardware	71
Software	71
Materiales	72
Coste total	73
Anexo III: Resultados	74
Anexo IV: Tabla de símbolos	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Pilares de la industria 4.0 [1].	8
Figura 1-2 Robot subacuático Pluto [4].	9
Figura 1-3 Concepto de un Glider [5].	10
Figura 2-1 Alejandro Magno explorando el fondo marino [6].	12
Figura 2-2 Diferencias entre un sonar activo/pasivo [9].	14
Figura 2-3 Comportamiento de una onda acústica en aguas frías [11].	15
Figura 2-4 Propagación de una onda acústica en aguas cálidas [11].	16
Figura 2-5 Drones kamikaze de la Armada Ucraniana [13].	17
Figura 2-6 USV Sead 23 [15].	18
Figura 2-7 Estación de control del Scan Eagle a bordo del BAA Galicia [18].	19
Figura 2-8 Primer prototipo de UUV americano [19].	19
Figura 2-9 Dry deck shelter a bordo de un submarino americano [22].	21
Figura 2-10 Concepto de letalidad distribuida americano [23].	22
Figura 2-11 Darpa Manta Ray [25].	23
Figura 2-12 Aspecto del bloque tanque-vejiga del Glider [28].	24
Figura 2-13 Descomposición de fuerzas que intervienen en el control de un AUV [28].	25
Figura 2-14 Trayectoria estándar de un Glider submarino [28].	25
Figura 2-15 Estudio hidrodinámico de un Glider tipo Spray [29].	25
Figura 2-16 Estudio hidrodinámico de un Glider tipo Darpa Manta Ray [30].	26
Figura 2-17 Inmersión estática vs Inmersión dinámica [31].	26
Figura 2-18 Torpedo alemán G7 [33].	27
Figura 2-19 Estructura general de un Glider [34].	28
Figura 3-1 Diseño en Inventor de escuadras de unión (autoría propia).	32
Figura 3-2 Soporte de madera (autoría propia).	33
Figura 3-3 Banco de ensayos (autoría propia).	33
Figura 3-4 Fondo cromado para ensayos (autoría propia).	34
Figura 3-5 Soporte del acelerómetro extruido en PLA (autoría propia).	35
Figura 3-6 Cabo de dyneema por roldanas (autoría propia).	35
Figura 3-7 Sistema de pesos calibrados (autoría propia).	36
Figura 3-8 Cortadora láser LP1060 (autoría propia).	36
Figura 3-9 Impresora 3D Ultimaker 3 (autoría propia).	37
Figura 3-10 Logitech Carl Zeiss Tessar HD 1080p [35].	37
Figura 3-11 WT901blecl5.0 [36].	38
Figura 3-12 Calibración del WT901blecl5.0 [36].	38

Figura 3-13 Diseño CAD del soporte del cilindro (autoría propia).	39
Figura 3-14 Solución gráfica de la coordenada longitudinal CG (autoría propia).	40
Figura 3-15 Diseño del guiador de cabos del péndulo (autoría propia).	40
Figura 3-16 Interfaz software RDWorks (autoría propia).	41
Figura 3-17 Proceso de impresión 3D en Ultimaker Cura (autoría propia).	41
Figura 3-18 Montaje banco de ensayos en MTpro (autoría propia).	42
Figura 3-19 Interfaz Logitech Capture (autoría propia).	43
Figura 3-20 Interfaz software Tracker (autoría propia).	43
Figura 3-21 Interfaz software WitMotion (autoría propia).	44
Figura 3-22 Datos medidos por el acelerómetro (autoría propia).	44
Figura 3-23 Procesado de datos con Octave (autoría propia).	45
Figura 3-24 Visualización del ensayo del CGx (autoría propia).	46
Figura 3-25 Descripción del módulo de control (autoría propia).	48
Figura 3-26 Visualización del ensayo de CGy (autoría propia).	48
Figura 3-27 MI en los ejes X e Y [37].	49
Figura 3-28 Centro de giro desplazado [37].	50
Figura 3-29 Ejemplo FFT de la trayectoria de un péndulo [38].	51
Figura 3-30 Ejemplo gráfica de movimiento de un péndulo [38].	51
Figura 3-31 MI en el eje Z [36]	52
Figura 3-32 Flujo del trabajo (autoría propia).	53
Figura 4-1 Posición longitudinal de CG en X4 (autoría propia).	55
Figura 4-2 MIx FFT (autoría propia).	59
Figura 4-3 Variación angular respecto al del tiempo MIx (autoría propia).	59
Figura 4-4 MIy FFT (autoría propia).	60
Figura 4-5 Variación angular respecto al tiempo MIy (autoría propia).	60
Figura 4-6 MIz FFT (autoría propia).	61
Figura 4-7 Variación angular respecto al tiempo MIz (autoría propia).	61
Figura 4-8 Ejercicio de corrección de pesos (autoría propia).	63
Figura 4-9 Cálculo de la flotabilidad del cilindro (autoría propia).	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Propiedades del acelerómetro.	38
Tabla 3-2 Medidas relevantes para los ensayos.	45
Tabla 3-3 Medidas para la obtención de CGx.	47
Tabla 3-5 Parámetros del prototipo definitivo.	48
Tabla 3-6 Medidas para la obtención de CGy.	49
Tabla 4-1 Prueba de validación CGx.	54
Tabla 4-2 Experimento real CGx.	55
Tabla 4-3 Componente longitudinal CG.	55
Tabla 4-4 Prueba de validación CGy.	56
Tabla 4-5 Experimento real CGy	56
Tabla 4-6 Prueba de validación MI.	57
Tabla 4-7 MI teórico del cilindro vacío.	57
Tabla 4-8 Errores teóricos.	58
Tabla 4-9 Experimento real MIx.	58
Tabla 4-10 Experimento en MIy.	59
Tabla 4-11 Experimento en MIz.	61
Tabla 4-12 Parámetros de interés para la corrección de pesos.	62
Tabla 0-1 Presupuesto Hardware.	71
Tabla 0-2 Presupuesto Software.	72
Tabla 0-3 Presupuesto materiales.	72
Tabla 0-1 CGx en X0.	74
Tabla 0-2 CGx en X1.	74
Tabla 0-3 CGx en X2.	75
Tabla 0-4 CGx en X3.	75
Tabla 0-5 CGx en X4.	75
Tabla 0-6 CGy en X0.	76
Tabla 0-7 CGy en X1.	76
Tabla 0-8 CGy en X2.	76
Tabla 0-9 CGy en X3.	77
Tabla 0-10 CGy en X4.	77
Tabla 0-11 MIx en X0.	77
Tabla 0-12 MIx en X1.	78
Tabla 0-13 MIx en X2.	78
Tabla 0-14 MIx en X3.	78

Tabla 0-15 MIx en X4.	79
Tabla 0-16 MIy en X0.	79
Tabla 0-17 MIy en X1.	79
Tabla 0-18 MIy en X2.	80
Tabla 0-19 MIy en X3.	80
Tabla 0-20 MIy en X4.	80
Tabla 0-21 MIz en X0.	81
Tabla 0-22 MIz en X1.	81
Tabla 0-23 MIz en X2.	81
Tabla 0-24 MIz en X3.	82
Tabla 0-25 MIz en X4.	82

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Con motivo del avance tecnológico en el que el mundo se ve inmerso en la actualidad y concretamente con la llegada de la Industria 4.0, el concepto de la tecnología está alcanzando nuevos horizontes. La Cuarta Revolución Industrial se centra especialmente en la interconectividad de equipos electrónicos inteligentes, también conocido como *Internet of Things*, así como la definitiva integración de dichos dispositivos inteligentes en nuestras vidas (Figura 1-1) [1].

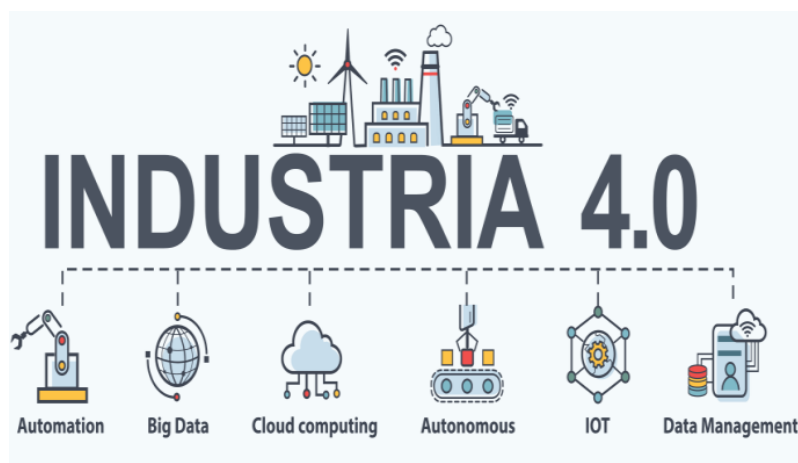


Figura 1-1 Pilares de la industria 4.0 [1].

El ejército español y en concreto la Armada no ha querido quedarse atrás en este proceso de cambio y lleva ya años esforzándose por evolucionar al concepto de Armada 4.0, presentado oficialmente en 2018. En aquel entonces se establecieron como pilares fundamentales el Apoyo Logístico y el Sostenimiento. Sin embargo, el actual vicepresidente de la Real Academia de Ingeniería de España, el Vicealmirante del Cuerpo de Ingenieros retirado D. Jose Manuel Sanjurjo Jul, en la Revista General de Marina 2020 apeló a la indispensable necesidad de la generación masiva de datos, así como su análisis efectivo, y su compartición de forma ágil y rápida [2].

Esta evolución se ha visto materializada principalmente en la implementación de vehículos no tripulados, ya sea con motivos directamente armamentísticos propiamente dichos, como en el ámbito de obtención de inteligencia. En este último caso, cabe destacar la incorporación de vehículos autónomos para la Guerra Antisubmarina, donde la recolección de datos del entorno es una actividad de vital importancia para operar con seguridad y lograr el dominio y superioridad en la mar. Dentro de este tipo de vehículos destacan los planeadores submarinos o *Gliders*, una sonda autónoma que destaca por su capacidad de desplazarse de forma sigilosa combinada con su gran autonomía. Es por ello por lo que en

este proyecto se pretende ofrecer una visión más profunda de este concepto, estudiando las características de este tipo de vehículos.

La ETID (estrategia de Tecnología e Innovación) es la publicación del Ministerio de Defensa que se ha encargado de definir aquellos objetivos relacionados con el desarrollo I+D+i a través de las metas tecnológicas que han de cumplir las Fuerzas Armadas para avanzar en esta era tecnológica [3].

En dicho documento se redactan numerosas necesidades adaptadas a los distintos servicios de las FAS, entre los cuales se pueden encontrar ciertos puntos vinculantes a la Armada y en concreto a este proyecto. Entre ellos cabe resaltar:

- Integración de vehículos autónomos no tripulados y sus correspondientes tecnologías y sistemas.
- Recolección masiva de datos y predicción del entorno en base a ellos.
- Tecnología de la información, comunicación y simulación.
- Sensores y sistemas electrónicos.
- Tecnologías comunes a bases e instalaciones, plataforma y combatiente.

En concreto los dos primeros puntos son los que hacen una mayor referencia al concepto del Glider: ya que se trata de una sonda batitermógrafo autónoma que permite recolectar una gran cantidad de datos, almacenarlos, y poder realizar predicciones de alcances de acústica submarina. Todos estos conceptos de desarrollarán más adelante para su mejor comprensión.

Los vehículos autónomos están creciendo en popularidad a una velocidad sin precedentes. Además de ello, parece que cuanto uno más se adentra en esta tecnología relativamente nueva, menos límites tiene, por lo que se espera que su mercado siga aumentando indefinidamente. La primera impresión al pensar en este concepto la podemos encontrar ya en la actualidad en muchos sectores, como en los robots camareros en algunos restaurantes modernos, o en coches inteligentes que pueden completar rutas con una mínima atención del conductor. Sin embargo, el mundo de la autonomía es mucho más amplio que eso.

Como ya se ha mencionado previamente, las Fuerzas Armadas han querido desde un primer momento mantenerse a la par con la sociedad civil en el empleo de esta nueva tecnología. Hoy en día, podemos encontrar desde aviones no tripulados, remotamente manejados a miles de kilómetros de distancia como los '*Predator*'; drones de reconocimiento terrestre embarcados en la flota, como el *Scan Eagle* de la 11ª Escuadrilla de Aeronaves; o robots subacuáticos como el Pluto (Figura 1-2) embarcado en la Escuadrilla de Medidas Contraminas para la detección de dispositivos explosivos en el fondo marino [4].



Figura 1-2 Robot subacuático Pluto [4].

El medio acuático se caracteriza por no ser el más idóneo para la transmisión de comunicaciones e intercambio de información, por ello la tripulación remota de vehículos subacuáticos es un problema añadido a tener en cuenta. Esto ha provocado el tener que afrontar esta evolución tecnológica desde otra perspectiva, y lo que ha parecido un remedio ideal es la automatización de acciones de los vehículos: correcciones de rumbo, balance y cabezada, navegaciones preestablecidas, emersión o inmersión ante determinadas situaciones, etc.

En el caso de este proyecto, el vehículo a estudiar será de tipo Glider, cuya misión es monitorizar diferentes parámetros del entorno subacuático, tales como la densidad del agua, la conductividad, porcentaje de oxígeno o las variaciones de temperatura, durante largos periodos de tiempo de forma autónoma. Tienen además la capacidad de enviar toda la información recopilada en tiempo real a la estación de control, donde posteriormente dicha información será digerida, interpretada y almacenada. Por tanto, por el momento se puede decir que este tipo de drones tiene su campo de aplicación mayormente en el ámbito de la investigación oceanográfica (Figura 1-3).

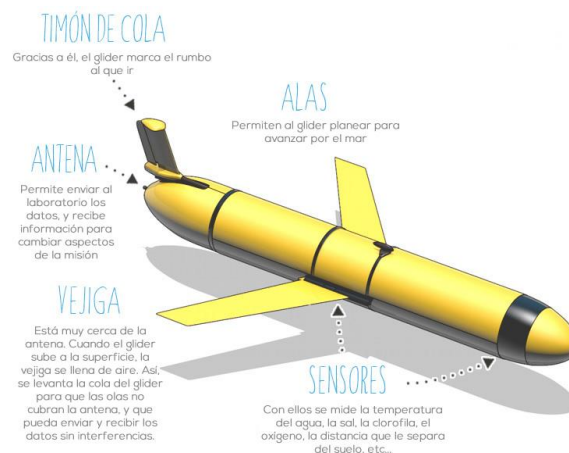


Figura 1-3 Concepto de un Glider [5].

En la actualidad, los *Glider* se diseñan como un conjunto capaz de realizar una misión en un entorno y con unas capacidades específicas. Dada la naturaleza de la Armada de participar en todo tipo de misiones por el mundo, su incorporación requeriría la necesidad de comprar múltiples *Glider* específicos para cada necesidad. Por tanto, para mejorar la eficiencia y no elevar demasiado el coste económico, en este proyecto se plantea la creación de un planeador basado en módulos intercambiables, para de tal manera facilitar la capacidad de personalización según lo requiera cada situación [5].

De este modo queda justificado el objetivo de este trabajo de Fin de Grado: diseñar unos de los módulos de un *Glider* funcional, el sistema de control y orientación en los planos horizontal y vertical, que le otorgue la capacidad de navegar de manera precisa durante largos periodos de tiempo, de una forma eficiente y con un diseño sencillo y económico; con el fin culminante de recolectar los datos necesarios para proporcionar a la Armada la ventaja en la Guerra Antisubmarina. Así, la Armada se pretende acercar aún más al concepto de Armada 4.0, a través de la generación masiva de datos y la producción y empleo de vehículos autónomos.

1.1 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es la elaboración de un modelo paramétrico de calibración de un módulo de control de orientación de un AUV, un planeador submarino no tripulado. Siendo la prioridad máxima durante el desarrollo del proyecto la de calibrar un sistema de orientación ya existente a través de diferentes métodos de medición.

Para poder llevar a cabo el objetivo principal, se plantean los siguientes hitos:

- Llevar a cabo un Estado del Arte sobre los *Gliders*, y los avances tecnológicos desarrollados en los últimos años.
- Definir e implementar una metodología para la calibración del AUV
- Validar la metodología de calibración del AUV
- Obtener el modelo paramétrico del módulo de control del AUV.

1.2 Estructura del trabajo

Una vez introducido este trabajo, se procederá con el desarrollo del estado del arte, donde se expondrán todos los estudios previos desde lo general a lo particular en el ámbito de los planeadores submarinos, ofreciendo de tal manera una visión sobre el entorno en el cual estos operan, así como su finalidad. Posteriormente en la tercera sección se hará una breve recapitulación de los materiales y software empleados para permitir el desarrollo del proyecto, así como una explicación del desarrollo de este, analizando los diferentes procedimientos y cálculos matemáticos requeridos para obtener los resultados deseados. A continuación, en la cuarta sección se verán reflejados los resultados de las deferentes pruebas realizadas, seguida de una quinta sección en la cual se desarrollarán las conclusiones de los resultados obtenidos, así como posibles líneas futuras con las que complementar lo estudiado en este proyecto en futuros estudios.

2 ESTADO DEL ARTE

En este apartado se va a estudiar todo aquello relacionado con el concepto de este proyecto, desde lo general a lo más particular, desde los orígenes hasta la situación actual. Para ello se van a desarrollar los siguientes temas:

1. La Guerra Antisubmarina y Acústica Submarina: Una introducción al mundo de la Guerra Antisubmarina con un breve contexto histórico, así como una explicación del funcionamiento de la transmisión de ondas acústicas en el medio marino, puesto que la información que recopile el *Glider* se empleará para realizar predicciones en este ámbito.
2. Vehículos Autónomos: explicación de los vehículos autónomos, distinción entre los diferentes tipos y su aplicación en las Fuerzas Armadas en la actualidad.
3. Vehículos autónomos submarinos: introducción a los vehículos específicos que trabajan bajo la superficie del mar, su empleo y los ejemplos presentes en el mercado. Además, se realizará un contexto histórico de su evolución desde su creación a la actualidad.
4. El *Glider* o planeador submarino: Explicación del dispositivo propiamente dicho, el concepto sobre el que trabaja, funcionamiento, y las líneas sobre las que se emplea. Desarrollo modular.

2.1 La guerra y acústica submarinas

El concepto de la Guerra Antisubmarina tiene una historia muy extensa, pudiendo remontarse incluso hasta la época del emperador macedonio Alejandro Magno, contando las escrituras antiguas que él mismo viajó en una cámara sumergible de vidrio con el fin de explorar el medio marino (Figura 2-1) [6].



Figura 2-1 Alejandro Magno explorando el fondo marino [6].

Sin embargo, la capacidad real de poder operar en dichas condiciones tiene una historia mucho más corta, dependiente de los avances tecnológicos en la construcción naval, propulsión y armamento. Esta progresión continua en línea ascendente hasta hoy.

Además, otra constante que se puede encontrar a lo largo de la historia en el campo militar submarino es que siempre ha sido la potencia más débil aquella que ha buscado desarrollar una ventaja submarina como arma, inicialmente para defender sus puertos y más adelante, para romper el control marítimo de un adversario en una zona que, de otra forma, estaría dominada por fuerzas de superficie y aéreas.

Por otra parte, los primeros datos reales conocidos que se recogieron en el estudio de la acústica submarina datan del siglo XV, cuando Leonardo Da Vinci desarrolló el primer sonar pasivo (*Sound Navigation and Ranging*). Un tubo que, al ser introducido en el agua, permite al operador que lo emplea escuchar el movimiento de buques en la lejanía.

No obstante, no sería hasta el siglo XIX, concretamente hacia la segunda mitad, cuando ciertas naciones como EE. UU., Francia, Alemania y Rusia experimentaron activamente una variedad de aparatos que se extendían desde lo que realmente era un torpedero capaz de ser tripulado desde el agua, hasta un verdadero sumergible que únicamente aparecía sobre la superficie para atacar a su blanco. También España trabajó en el avance de estas embarcaciones, apareciendo sobre el papel célebres nombres como el de Isaac Peral, Narciso Monturiol con su *barco pez* o Cosme García. Tras varios estudios a lo largo de este siglo, el gran impulso de la acústica submarina llegaría definitivamente en el siglo XX, donde la necesidad de perfeccionar el concepto de sonar fue vital para el transcurso de la 1ª y 2ª Guerras Mundiales, además de suponer el asentamiento definitivo de la capacidad antisubmarina como cualidad para determinar el poder militar de una nación [7].

En primer lugar, comenzaremos con la 1ª Guerra Mundial, donde las naciones involucradas, en especial Alemania, emplearon submarinos como medio de ataque y defensa con el fin de dominar los mares. Su uso fue un éxito, siendo tan letales, que tenían la habilidad de poner en jaque a cualquier flota, siendo capaces de cortar cualquier operación de superficie y líneas de transporte mercantil con la presencia de un único submarino. Entorno a esta ventaja tecnológica fue que se comenzó a hacer mucho mayor hincapié en la Guerra Antisubmarina, elaborándose numerosas técnicas y maniobras con las cuales poder mitigar lo máximo posible el daño causado por los submarinos alemanes. Los sonares pasivos eran por el momento el medio más popular para la detección por ambos bandos. Sin embargo, su capacidad de detección quedaba ‘coja’, puesto que únicamente permitía conocer la demora o posición angular respecto al equipo, del contacto de interés. Debido a las limitaciones de la aún emergente detección acústica, y la característica de los submarinos de requerir recargar baterías, que les obligaba a hacer superficie de manera frecuente, lo que les hacía vulnerables, durante esta Guerra prevalecieron otras medidas para superar a los submarinos, tales como el empleo de la aviación naval, el minado o los convoyes.

No obstante, los protagonistas de la guerra, al ver el elevadísimo potencial de la nueva arma que se había creado, se guardaron en el tintero la explotación del arma submarina para futuras ocasiones. Es más, ya en el periodo de transición entre ambas Guerras Mundiales, algunas marinas como la inglesa comenzaron a invertir en su estudio, introduciendo al poco tiempo el ASDIC en sus unidades, uno de los predecesores del sonar activo. Este no solo podía detectar la demora de un contacto, sino que también proporcionaba la distancia al mismo con un elevado nivel de precisión. Este invento revolucionario facilitaba por tanto la detección de enemigos debajo de la superficie, proporcionando por fin una capacidad considerable a una unidad de superficie de cazar submarinos. Sin embargo, el uso del sonar activo no siempre suponía una ventaja táctica, ya que, al emitir un sonido bajo el agua, los submarinos muchas veces advertían la presencia de un buque de guerra mucho antes de que sucediera lo contrario. Para esclarecer algo más este fenómeno, a continuación explicaré brevemente la diferencia entre ambos tipos de sonares [8]:

- Por un lado, cuando hablamos del concepto de sonar pasivo, nos referimos a un equipo que únicamente es capaz de recibir sonidos y detectar la dirección por la que entran en el equipo. Se puede además determinar la frecuencia de dichos sonidos recibidos, con lo que con un poco de preparación, inteligencia y experiencia se puede distinguir con bastante precisión que o quien ha emitido ese ruido. Con el fin de mostrar al lector de que información se es capaz de recabar con únicamente un ruido emitido por un buque en navegación, se pueden determinar el número de palas de la hélice de este, y saber si el ruido proviene del interior del buque o si este es provocado por un motor en marcha (Figura 2-2).
- Por otra parte, al referirnos a un sonar activo, damos al sonar una nueva capacidad. Su funcionamiento se basa en la emisión de un pulso de ultrasonido del cual se espera su regreso al “chocar” con una superficie rígida bajo el agua. El funcionamiento es muy similar al de un radar de superficie que emite ondas electromagnéticas que al topar con un blanco regresan a la antena receptora y reflejan un crudo en pantalla, pero con ondas acústicas ya que su transmisión en el medio acuático es mucho más idónea que la de la energía electromagnética. De tal manera, según la velocidad de transmisión de la onda, y el tiempo de retorno, somos capaces de conocer la distancia a la que se encuentra un contacto, y ende su situación exacta en un momento determinado [9].

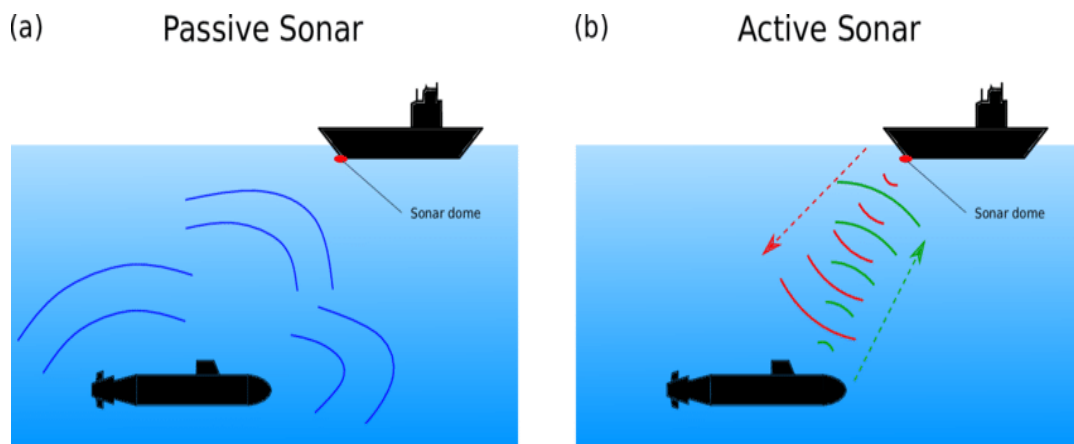


Figura 2-2 Diferencias entre un sonar activo/pasivo [9].

Por mucho que a priori parezca que un sonar activo es mucho más adecuado que uno pasivo para la detección, esto no es del todo cierto. El hecho de que se requiera que una onda acústica viaje, choque en un blanco, y vuelva a nuestra exacta posición, puede ser complicado, ya sea por las propiedades del propio entorno marino que no facilitan su transmisión, como por la temperatura o salinidad, o porque la superficie en la que chocan está especialmente diseñada para desviar las ondas que incidan en ella, con el fin de desviar la atención del sonar buscador. Además, en caso de que la onda emitida por el sonar impactase en el blanco deseado, el submarino conocería en automático la demora del buque emisor mediante el uso de un sonar pasivo únicamente se mantiene a la escucha y le basta con escuchar un ruido para saber de dónde proviene.

Durante la Segunda Guerra Mundial, aunque los avances en la tecnología de detección submarina habían mejorado considerablemente respecto al conflicto anterior, el concepto de submarino también se había refinado considerablemente, por lo que los encuentros buque-submarino fueron igual de sangrientos para los convoyes de superficie. Esta evolución del submarino introdujo el método “*Schnorkel*”: un método con el cual los submarinos podían recargar sus baterías, o repostar sus motores en inmersión sin asomar sobre la superficie nada más que una pequeña cúpula desde la que tomar el aire necesario y expulsar los gases procedentes de los motores. De tal manera, el tiempo de superficie necesario y el ruido emitido por los submarinos se redujo notablemente, por lo que detectarlos nuevamente se hizo una labor más que complicada [10].

Ya en el marco de la Guerra Fría, el nivel de conocimiento respecto a las propiedades del entorno marítimo experimentaría un gran avance, alcanzando el empleo de submarinos el máximo exponente como medida disuasoria. No obstante, llegarían a su vez de la mano nuevas incógnitas y parámetros a tener en cuenta sobre los efectos del entorno en acústica submarina. La combinación entre el clima de la zona, la temperatura del agua, las corrientes, la estación del año, se convirtieron de repente en solo unas de las innumerables variables a tener en cuenta para conocer el alcance de un sonar a diferentes profundidades. A continuación, se explicarán las diferentes maneras de propagación de una onda acústica según viaje por aguas cálidas o frías. Para ello se ha empleado un programa que muestra un esquema general de propagación [11].

La Figura 2-3 presenta la propagación de una onda acústica emitida por un sonar en aguas frías. Como se puede apreciar en la superficie encontramos agua a temperatura templada, prosiguiendo con un gradiente positivo muy pronunciado, volviendo después de este a bajar considerablemente las temperaturas. La línea o capa de separación que separa la zona de altas temperaturas con el gradiente negativo se denomina termoclina. Lo que ocurre es que la superficie del agua por el mero hecho de estar en contacto con el aire del ambiente se enfría, en cuanto nos sumergimos este contacto se pierde, sin embargo, la radiación solar sigue alcanzando dichas sondas por lo que el agua en esa zona se calienta. Cuando la luz solar deja de ser capaz de poder penetrar en el agua, a determinada sonda, la temperatura comienza a caer bruscamente de nuevo. De tal manera, el comportamiento de propagación de la onda acústica se refleja en dos direcciones. Una capa de velocidades en la superficie que genera reflexión al chocar con la termoclina y queda atrapada en el canal de superficie, y los rayos que superan un determinado ángulo, denominado el ángulo crítico, consiguen atravesar la termoclina y continúan propagándose hacia el fondo.

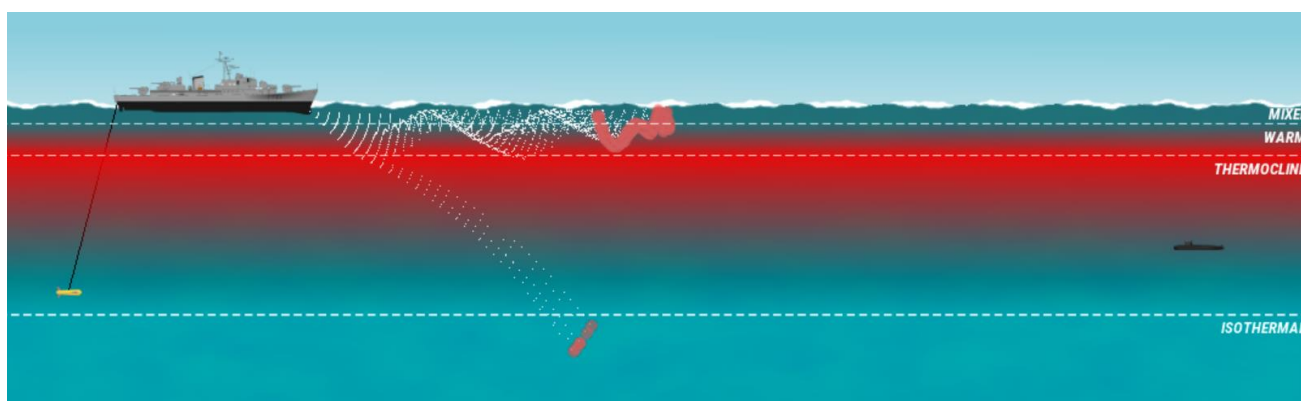


Figura 2-3 Comportamiento de una onda acústica en aguas frías [11].

En esta segunda figura, se puede observar la propagación de una onda acústica en un entorno marino cálido. A diferencia del caso anterior, al estar el ambiente exterior también caliente, la temperatura desciende de manera gradual, provocando en las ondas sonoras un fenómeno de refracción que hace que desciendan hasta que, o bien se reflexionan una vez alcanzan la suficiente velocidad, o rebotan el fondo. Esta situación genera grandes zonas de sombra, donde la detección es inviable, y es donde los submarinos aprovechan a esconderse. En la actualidad, existen medios para sortear el obstáculo que supone el cambio de capas, entre los que destacan los sonares sumergibles de profundidad regulable o las sonoboyas tanto pasivas como activas (Figura 2-4).

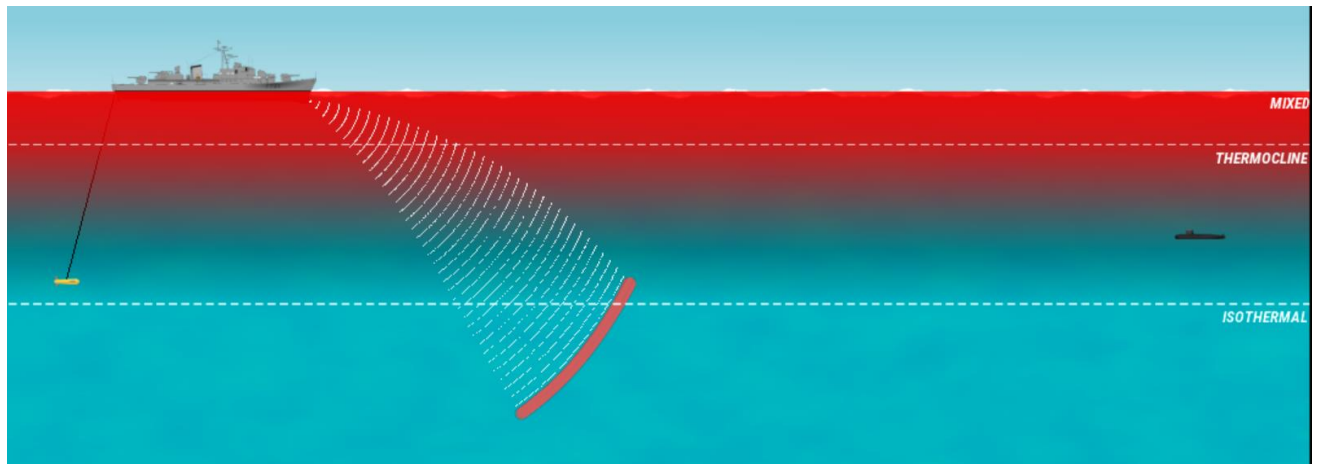


Figura 2-4 Propagación de una onda acústica en aguas cálidas [11].

Gracias a todos estos avances y al impulso tecnológico experimentado en el ámbito de la Guerra Antisubmarina durante la Guerra Fría, se han creado numerosos programas capaces de generar predicciones de alcance sonar, como el *WADER 32*, de desarrollo británico, actualmente empleado en las fragatas de la Armada. Sin embargo, estos requieren de ciertos parámetros que se deben suponer debido a la insuficiencia de datos posibles de recabar en una zona marítima, por lo que en ciertos casos estas predicciones son poco precisas. La recolección masiva de datos en una determinada zona marítima permitiría generar bases de datos con las cuales poder realizar predicciones muchos más acertadas.

2.2 Vehículos autónomos

El nacimiento de los vehículos autónomos surge entorno a la idea de eliminar el error que puede cometer un ser humano a la hora de realizar ciertas tareas, mediante la automatización de acciones que puede realizar una máquina. Desde ese punto de partida, han surgido multitud de conceptos e ideas sobre donde pueden ser más útiles estas técnicas de automatización abriendo la puerta a un nuevo mundo que hoy en día sigue sin parecer tener límites. Sin embargo, a pesar de que, con tiempo, dedicación y el avance tecnológico necesario, se puede lograr implementar esta capacidad, existen varios casos en los que la autonomía completa de un equipo no es deseable. Uno de estos casos a debatir es el mundo militar, donde procederé a hacer una reseña sobre el uso de estos vehículos a continuación.

Cuando se habla del término ‘autonomía’, relacionado a un vehículo, lo primero que le puede venir a uno a la mente es su capacidad de no necesitar una supervisión o control externo para llevar a cabo una cierta tarea o incluso la era interacción con un ser humano en ningún momento. No obstante, el grado de autonomía otorgado se puede dividir en diferentes categorías, lo que abre paso a la construcción de múltiples tipos de vehículos según la labor a desempeñar.

El principio sobre el que trabajan los autómatas es sencillo: se les debe dotar de ciertos sensores que recojan información para que cuando se cumplan una serie de condiciones o requisitos, éste actúe de una forma determinada. Ya que para poder lograr cierto grado de autonomía la tecnología y componentes electrónicos a implantar suelen ser de una complejidad y precios elevados, en numerosas ocasiones no se puede, e incluso ni se desea, implantar un sistema puramente autónomo, si no que se realiza de manera parcial. Existen un total de 5 niveles de automatización posible que expondré a continuación [12]:

- Nivel 0: corresponde a un grado de automatización nulo. El vehículo dependerá totalmente del conductor o piloto en todas sus tareas.
- Nivel 1: corresponde a un nivel mínimo de autonomía, relacionado especialmente con funciones de control, como serían en los coches las recargas de los frenos.

- Nivel 2: corresponde a un grado de autonomía en el cual al menos dos de las funciones principales quedan en manos del vehículo en cuestión.
- Nivel 3: corresponde a una conducción automática limitada. En esta situación el vehículo aun requiere de un controlador que tome el control en situaciones preestablecidas que salgan del modus operandi para el que se ideó el vehículo. Se podría decir que el vehículo a este nivel es capaz de operar en condiciones normales, aunque aún no está preparado para enfrentarse a un escenario cambiante, por lo que se diseña con la capacidad de devolver el control al conductor.
- Nivel 4: corresponde a un nivel de automatización total. El vehículo es capaz de realizar viajes de forma completa, pudiendo tomar decisiones en función de diferentes parámetros que mida o situaciones a las que se enfrente.

Un claro ejemplo de estos niveles de automatización la podemos encontrar sin ir más lejos en nuestros propios buques cuando activamos el ‘piloto automático’, dejando a merced del buque la regulación de rumbo y velocidad en base a unos parámetros preestablecidos. No obstante, al igual que con el *Glider*, se prevé que los buques de navegación aumenten considerablemente su capacidad de dirigirse de manera autónoma, incluso siendo capaces de ser monitorizados en su totalidad por un único operador desde el puente de gobierno de dicho buque. En el caso concreto de los buques de guerra esta capacidad se pretende extender hasta el control de sistemas de armas sin exponer un operador físico presente en el puesto de tiro y en ejemplos extremos que no se encuentren ni siquiera a bordo del buque que esté abriendo fuego. Este ejemplo se puede ver en los drones de superficie kamikazes no tripulados empleados por la Armada Ucraniana (durante el presente conflicto contra Rusia, los cuales están demostrando ser un factor determinante en el desarrollo del conflicto por su velocidad, discreción y potencia de fuego [13]).



Figura 2-5 Drones kamikaze de la Armada Ucraniana [13].

Al igual que la Armada Ucraniana mencionada previamente, con el surgimiento de nuevos conflictos y la tensión bélica internacional constante actual, las diferentes Fuerzas Armadas del mundo están realizando una inversión económica y tecnológica sin precedentes para mantenerse a la vanguardia en este ámbito. Haciendo nuevamente referencia a la mención del Vicealmirante Sanjurjo sobre la revolución tecnológica en la que nos veíamos inmersos ya en 2018, para aquel entonces la Armada ya poseía equipos inteligentes autónomos de diferentes índoles, desde el recuento y control de inventarios en almacenes y buques hasta los primeros prototipos del Pluto, también expuesto anteriormente. Sin embargo, estos quedaban lejos de las intenciones operativas de la Armada que ya en aquel entonces soñaba con el desarrollo de buques y aeronaves capaces de ser desplegados y realizar

cometidos de obtención de inteligencia en diversos escenarios reduciendo notablemente los costes en tamaño y combustible requerido para vehículos tripulados. Además teniendo en cuenta el factor humano, gracias a estas incorporaciones se lograría reducir notablemente la exposición innecesaria de operadores a situaciones de peligro, como pueden ser el repostaje de aeronaves y buques en caliente o maniobras de aprovisionamiento y traslado de materiales; actividades que a día de hoy suponen una tasa de cerca del 50% del número total de bajas e incidencias registradas a bordo de los buques en los últimos años [14].

Otro caso muy claro en el que se podrían aprovechar las ventajas que ofrece la tecnología en el ámbito de la automatización, de nuevo para prevenir poner en riesgo al personal que participa en dichas maniobras, es en el rescate de náufragos (*Man Over Board*, en inglés). Para llevar a cabo esta maniobra, el correcto y seguro empleo de la embarcación de rescate es primordial, sin embargo, debido a sus características de tamaño, potencia etc. su uso se ve bastante limitado en cuanto las condiciones meteorológicas no son las idóneas. En la actualidad, el gobierno de este tipo de embarcación se le confía a un patrón, quien debido al estado de la mar y otros fenómenos climatológicos puede perder la capacidad de control e incluso la orientación de la embarcación (a pesar de todos los utensilios y equipos de ayuda que lleve a bordo). Debido a la complejidad y adversidades que se pueden dar en este tipo de maniobras, el constante adiestramiento es vital para asegurar la rapidez y seguridad en un supuesto real. El empleo de vehículos autónomos podría reducir enormemente la necesidad de adiestramiento del operador y tripulación, y, asimismo, podría suponer una gran mejora en la eficacia en el desarrollo de este tipo de maniobra, ya que sería esta misma la que calcularía su propia ruta en función de las condiciones del medio.

Aunque aún no existe un prototipo físico especialmente ideado para operar en este tipo de escenarios, ciertas empresas como NAVANTIA, UTEK, Marine Instruments, y Seadrone han comenzado a desarrollar un modelo de vehículo no tripulado, controlado de forma remota, destinados para diferentes cometidos; el USV Sead 23 (Figura 2-6), cuyas primeras pruebas en un escenario de alta intensidad de superficie fueron satisfactorias [15].



Figura 2-6 USV Sead 23 [15].

Para finalizar este apartado, se pretende diferenciar los tipos de vehículos no tripulados que existen y que en numerosas ocasiones provocan confusión entre términos de este nuevo tipo de tecnología emergente. Estos dos subgrupos son los vehículos o equipos autónomos y los no tripulados. El concepto, a pesar de ser similar, difiere en las características esenciales de cada uno. La Organización de Aviación Civil Internacional ha intentado arrojar algo de luz sobre esta discusión estableciendo una serie de definiciones para diferentes tipos de vehículos inteligentes según su naturaleza y capacidades, extrapolables a los medios terrestre, aéreo y marítimo [16]:

- UV: vehículo no tripulado.

- UAV/USV: vehículo aéreo no tripulado/ vehículo de superficie no tripulado.
- UAS: sistema aéreo no tripulado (conjunto aeronave/dron + estación en tierra/superficie + enlace de comunicaciones).
- RPA: aeronave controlada de forma remota.
- RPAS: sistema de aeronaves controlado de forma remota (conjunto aeronave control remoto + estación de control en tierra + enlace de comunicaciones).
- Dron: forma genérica de nombrar aeronaves no tripuladas, sin embargo, está más enfocado a aquellas con un peso igual o inferior a los 25kg.

Un claro ejemplo de esta confusión es la aeronave por control remoto SCAN EAGLE que emplea la Armada en misiones de vigilancia marítima y terrestre. Al SCAN EAGLE se le suele atribuir el término de dron, sin embargo, si observamos con detenimiento sus características y capacidades, nos daremos cuenta que encaja mucho mejor en la definición de un RPAS [17]. Esta aeronave no tripulada debe poseer una estación de control en tierra o en un buque de superficie y posee antenas propias para establecer comunicaciones con dichas estaciones. Además, ha de tener su propia tripulación, instruida en vuelo, adiestrada en su empleo, y concienciada con el hecho de que están tripulando de manera remota una aeronave que se encuentra volando a cientos de kilómetros de su posición (Figura 2-7) [18].



Figura 2-7 Estación de control del Scan Eagle a bordo del BAA Galicia [18].

2.3 Vehículos autónomos submarinos

La historia de los UUV (*Unmanned Underwater Vehicles*) se remonta a la década de los 50 del siglo XX, con un primer prototipo denominado *Self Propelled Underwater Research Vehicle*, desarrollado por la marina norteamericana dedicado a la oceanografía (Figura 2-8) [19].



Figura 2-8 Primer prototipo de UUV americano [19].

Este *UUV* incorporaba un módem acústico para la comunicación, un sonar de barrido lateral para la recogida de datos batimétricos y un sistema acústico de posicionamiento y navegación submarina con IMU (unidad de medición inercial) y sonar DVL (registro de velocidad Doppler) para la navegación [20].

Se puede decir sin embargo sin temor a equivocación que los precursores claros de los *UUV* son los *ROV*, vehículos autónomos unidos a una nave de control por medio de un cable umbilical a través del cual se aporta energía eléctrica y datos de control al *ROUV* (**R**emotely **O**perated **U**nderwater **V**ehicles) y dicho vehículo también transmite la información que recaba del entorno de vuelta al buque. Estas cualidades facilitan enormemente el empleo del vehículo, sin embargo, lo hace incompetente para labores más clandestinas, así como en operaciones a largas distancias de donde se encuentra el buque. La Armada en concreto lleva ya años trabajando con este tipo de vehículos desde por ejemplo sus cazaminas en la Clase Segura, como el Pluto Plus que mencioné anteriormente.

Centrando nuevamente un poco más el tiro en la naturaleza de este proyecto, a continuación, pasaré a centrarme en los vehículos no tripulados en el ámbito submarino, comúnmente denominados *UUVs*. Se puede dividir a su vez en dos subgrupos, los *ROUV* y los *AUV* (**A**utonomous **U**nderwater **V**ehicles). Este último tipo de vehículos tiene una complejidad añadida respecto a sus equivalentes que operan en escenarios aéreos, terrestres o de superficie. En concreto esta desventaja reside en la complejidad de establecer comunicaciones entre un operador o estación de control y el propio vehículo mientras este desempeña su función, puesto que el espectro electromagnético no es el medio óptimo para la transmisión de datos bajo la superficie del mar.

De tal manera, prosiguiendo con una definición general de un *AUV*, se puede decir que se trata de un tipo de vehículo no tripulado que opera de forma autónoma, sin conexión directa (cable umbilical) con una unidad nodriza. En comparación con los vehículos submarinos operados de manera remota (*ROUV*), el hecho de prescindir de una conexión directa con un operador permite a los *AUV* operar en escenarios a mayor distancia, a la vez de dar solución a la problemática asociada a la posibilidad de enredarse del cable umbilical que poseen los *ROUV*. Asimismo, los *AUV* tienen una mayor autonomía y mayor peso, característica directamente ligada a los numerosos sistemas de almacenamiento de energía requeridos (baterías) que deben equipar para de esta manera operar durante extensos periodos de tiempo hasta cumplir su cometido [21].

Existen muchas maneras de clasificar a los vehículos autónomos submarinos, siendo una de ellas según su tamaño, ya que, en función de este tendrán una serie de cometidos u otros.

Los *SAUV* (*Small AUV*) son aquellos que pueden ser portados por un único operador, ya que su diámetro no excede de los 25 centímetros. Es evidente que, por su reducido volumen, sus capacidades serán bastante limitadas (especialmente por la escasa autonomía de la que disponen). Sin embargo, sí que pueden encontrar su uso, como por ejemplo en el entorno de las operaciones especiales.

Los *MAUV* (*Medium AUV*) corresponden a aquellos vehículos que poseen un diámetro entre los 25 y los 53 cm, siendo el superior de estos el mismo diámetro estándar que poseen los torpedos pesados. Esto implica que los *MAUV* están pensados para poder ser lanzados desde un submarino propiamente dicho, a través de los tubos lanzatorpedos. Como veremos más adelante, existen *UUV* de mayor tamaño que se pueden lanzar desde algunos submarinos. Sin embargo, estos deberán acoplarse a la plataforma a través de adaptaciones especiales. La ventaja por tanto de los *MAUV* es que cualquier submarino, incluso los más modestos podrán emplearlo.

Los *LAUV* (*Large AUV*) son los que poseen un diámetro de entre 53 y 213 centímetros. Como mencioné anteriormente estos vehículos no caben físicamente en un tubo lanzatorpedos, sin embargo, sí que existen acoples como el *DDS* (*Dry Deck Shelter*) (Figura 2-9), que operan los submarinos Clase Ohio de la marina americana o los Clase *Astute* británicos. Si bien las capacidades de las que disponen estos *AUV* son superiores a las de sus hermanos pequeños, observamos como el exceso tamaño para muchas situaciones también puede ser una limitación (Figura 2-9) [22].



Figura 2-9 Dry deck shelter a bordo de un submarino americano [22].

Por último, encontramos los *XLAUV* (*Extra Large AUV*), que son aquellos que superan los 213 centímetros de diámetro, es decir, que estos vehículos prácticamente se podrían considerar como pequeños submarinos. El empleo de estos *AUV* ya se empieza a complicar para poder ‘lanzarse’ desde otros submarinos, debido a su elevado peso, no obstante, desde ciertos buques de superficie o desde tierra pueden ser operados sin inconveniente. Por supuesto, estos serán los *UUV* más competentes y capaces en cuanto a autonomía y prestaciones, ya que además poseen espacio de almacenamiento suficiente para transportar cargas útiles de tamaño considerable [19].

Habiendo clasificado los *AUV*, pasaremos a hablar de los escenarios en los que su utilización puede desempeñar un papel determinante, especialmente hablando de operaciones militares de alta intensidad. Un ejemplo claro son los escenarios *A2AD*. El argumento a favor de su empleo es muy sencillo: para poder acceder a zonas donde el enemigo no nos permite pasar, lo más adecuado es emplear medios que no puedan ser detectados. Ese medio, por mucho que existan otros como los cazas de 4ª, 5ª o incluso 6ª generación, con una firma radar casi nula y capaces de superar con creces la velocidad del sonido, es el submarino. El problema de los submarinos es que son muy costosos, y además juegan con la desventaja de llevar vidas humanas a bordo, por lo que las consecuencias de ser detectados y acorralados en una zona *A2AD* podrían ser catastróficas. Otro factor a tener en cuenta es, que, como vemos en la actualidad, cada vez hay menos submarinos disponibles, y sin embargo las misiones ideales para ser desempeñadas por submarinos no parecen hacer más que aumentar exponencialmente. Señalando algunas de las zonas *A2AD* que existen en la actualidad como el mar rojo, en la cual la marina americana opera con frecuencia a raíz del conflicto entre Israel y Palestina; y el conflicto de Yemen, estas podrían volverse inaccesibles en algún momento empleando medios tan voluminosos como buques o submarinos. Además, de cara a la imagen pública, se puede considerar menos ‘invasivo’ el empleo de un *AUV* en una zona *A2AD* ajena, que el de un submarino si este es descubierto, ya que por sus elevadas capacidades y sistemas de armas podría aparentar con más facilidad un intento de acción hostil contra la soberanía de una nación.

Siguiendo con esta línea, existe otro concepto que ha provocado sacar a los *AUV* a la palestra, y es la nueva teoría de la letalidad distribuida (Figura 2-10) de la marina americana. La fuerza y potencia naval tal y como hoy las conocemos y podemos ver en cualquier despliegue, se basan en el empleo de superportaaviones de cien mil toneladas como núcleo de un grupo de combate para para lograr la superioridad armamentística y aérea en cualquier situación bélica que se puede dar en y desde la mar. Sin embargo, han surgido diversas críticas hacia la concentración de la gran parte de una fuerza de combate en pocos o un solo activo y grandes barcos. La razón de esta nueva ideología es evitar que

nuestro enemigo pueda diezmar la capacidad de combate de una flota neutralizando únicamente unos pocos activos. También se argumenta que los portaaviones son imposibles de defender con certeza y por tanto no se debería apostar por poner ‘todos los huevos en la misma cesta’. Al igual que en el ámbito de la Guerra Antisuperficie, este ejemplo se puede extrapolar al mundo submarino, donde en la actualidad se apuesta por gigantes submarinos nucleares, los cuales si son derribados no solo causarían numerosas bajas humanas en la dotación, sino que las consecuencias provocadas por la explosión de un reactor nuclear, además de las posibles ojivas que transportase, podría suponer un desastre medioambiental catastrófico. La alternativa propuesta por tanto sería el empleo de muchas más unidades con una carga de guerra menor, es decir, más repartida entre dichas unidades que serían más pequeñas, maniobrables y económicas [19]. Es por esa razón que los AUV se presentan como una alternativa ideal, ya que empleados en forma de enjambre, gracias a su sigilo, a pesar de su poca capacidad de almacenamiento y de transportar armamento pesado, podrían fácilmente colapsar una zona A2AD generando un factor psicológico en el enemigo similar al de una zona marítima minada [23].

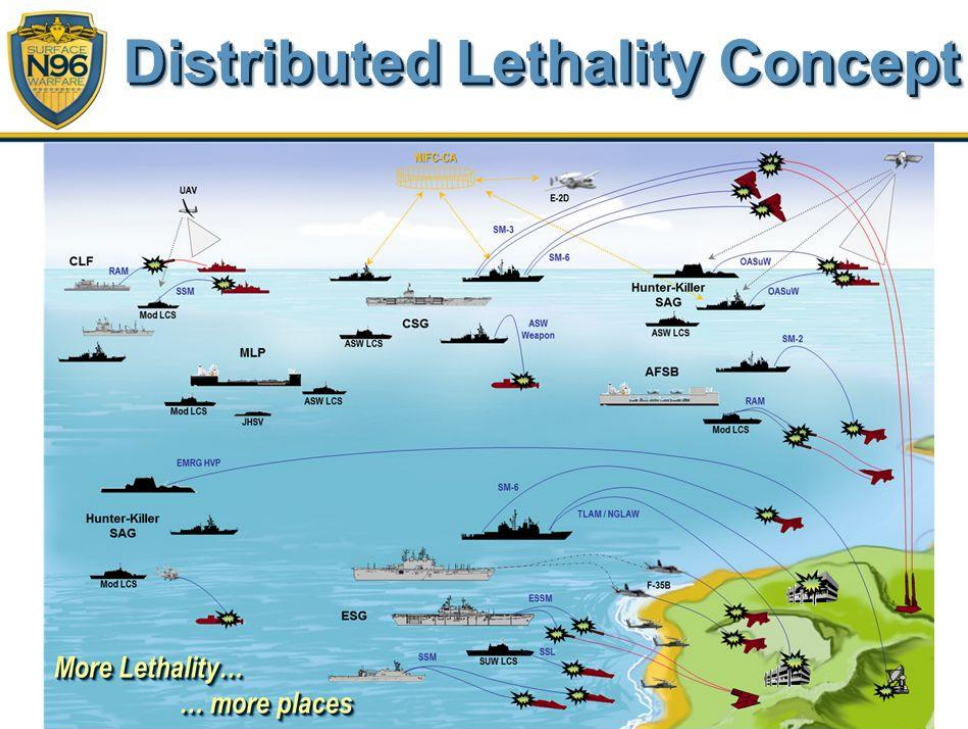


Figura 2-10 Concepto de letalidad distribuida americano [23].

Dejando a un lado el panorama directamente bélico, estos vehículos pueden presumir de ser idóneos para otros cometidos, como la recolección de datos hidrográficos. Sin embargo, podría aparecer una nueva línea de acción los AUV, ya que de nuevo gracias a su sigilo son perfectos para la realización de tareas de tipo ISR (*Intelligence Surveillance Recognition*) en cualquier zona de interés. La idea sería que fuesen capaces de portar una serie de sensores, cámaras de vigilancia de alta resolución y antenas/sonares para poder ser desplegados en variedad de misiones, de nuevo sin la necesidad de poner en peligro un submarino con tripulación a bordo [24]. De momento no existe en España un prototipo claro de AUV con estas capacidades, sobre todo por el aspecto de la autonomía. Sin embargo, en el *Glider* que se plantea en este proyecto, se pretende romper esta barrera que aún existe en la Armada como primer prototipo de lo que podría ser una sonoboya con propulsión, autónoma, en un futuro muy no demasiado lejano.

En la actualidad, otras marinas como la estadounidense, china o la británica ya han desarrollado los primeros prototipos para explotar sus capacidades en este tipo de misiones. Entre otros destacan el HSU-001 chino de 7 metros de eslora, el cual se cree que es capaz de operar durante semanas o incluso

meses en misiones ISR; así como el DARPA Manta Ray norteamericano (Figura 2-11), el cual se asemeja a lo que potencialmente pretende parecerse el *Glider* de este proyecto [25].

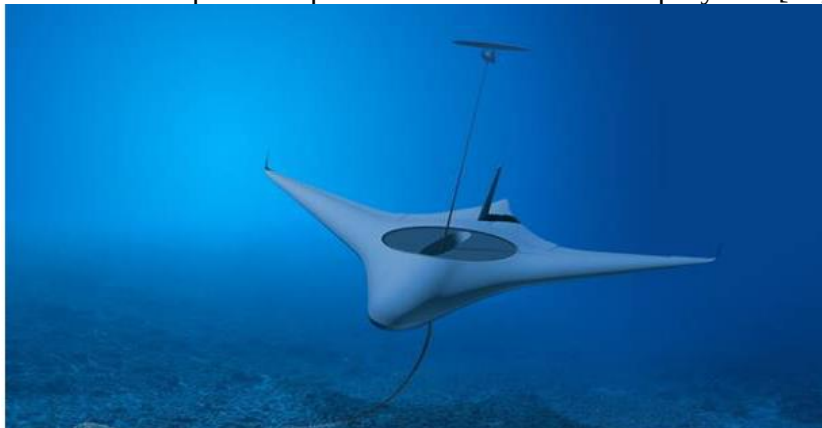


Figura 2-11 Darpa Manta Ray [25].

2.4 El Glider

En este proyecto, el vehículo que se pretende presentar es un *Glider* o planeador submarino. Más concretamente, un vehículo submarino capaz de recolectar datos concurrentes e inteligencia en el entorno marítimo en el que se encuentre.

Este vehículo deberá poseer una capacidad indispensable de poder operar durante largos periodos de tiempo de manera independiente, autonomía proporcionada por su forma de desplazamiento, planeando sigilosamente en por entorno marino.

2.4.1 Concepto del Glider

A diferencia de los ROUV, no se comenzaría a trabajar en el primer prototipo de un *Glider* propiamente hasta mucho más entrado el Siglo XX, concretamente durante la última década cuando el científico estadounidense *Henry Stommel* en 1989 definió la posibilidad de recorrer las profundidades marinas mediante pequeños vehículos autónomos que controlasen su propia flotabilidad a través de una vejiga inflable y regulasen sus movimientos mediante aletas laterales inclinadas unos 35 grados. Estos además serían capaces de al finalizar sus cometidos de análisis, volver a hacer superficie durante breves instantes, para de esta manera transmitir toda la información recopilada a una antena en tierra o en un buque y recibir nuevas instrucciones de operación. Como sus costes y tiempo de construcción serían muy inferiores a los de un buque de superficie o submarino estándar, pueden ser reutilizables, son lo suficientemente ligeros como para ser manejados y desplegados desde plataformas pequeñas y pueden operar durante meses recorriendo miles de kilómetros, los *Glider* estaban destinados desde un primer momento a convertirse en los vehículos a cargo de controlar el fondo marino, sustituyendo a sonoboyas y submarinos [26]. Al poco tiempo de estas declaraciones, cuando comenzaron a crearse los primeros modelos, se definieron 4 clases de *Glider* submarinos que siguen representando las bases de estos vehículos en la actualidad [27]:

- 1) Aquellos que emplean medios mecánicos o electrónicos para variar su flotabilidad.
- 2) Aquellos que emplean el gradiente térmico de las profundidades marinas para la obtención de energía empleada para regular la flotabilidad. Estos, también denominados *Thermal Gliders*, destacan por su capacidad de sustentar su bloque de sensores y sistemas vitales, por medio de la variación de temperatura del agua de mar. El gran salto térmico, provoca efectos de expansión y contracción de materiales y fluidos en el interior del cilindro, por lo que estos ‘movimientos’ se aprovechan para generar energía dentro del sistema.
- 3) Aquellos capaces de aprovechar las corrientes marinas, así como la energía undimotriz (oleaje).

- 4) Aquellos que emplean métodos estándar de propulsión (motor eléctrico y hélice trasera) denominados híbridos. A pesar de que el primer prototipo planteado para este proyecto no incluye esta capacidad, al tratarse de un *Glider* pensado para operar, en un principio, en aguas poco profundas, probablemente serviría de gran ayuda para estudiar el entorno en una cota de particular interés.

2.4.2 Principio de funcionamiento

El *Glider* posee un movimiento característico que se asemeja considerablemente al de un submarino, ya que viene predeterminado por la flotabilidad. Este tipo de AUV posee una vejiga en la parte posterior que puede llenarse indistintamente de agua o aceite para hacer variar su flotabilidad (Figura 2-12). A la hora de descender en profundidad, el *Glider* vacía su vejiga a través de una válvula rotativa que la conecta con un tanque interno que la ceba y desceba, provocando en este una variación del volumen desplazado de agua de mar y por tanto reduciendo el empuje, traduciéndose en el hundimiento de este. Cuando comienza el descenso, se induce una diferencia de presiones en las alas que le dan la capacidad de avanzar en el plano horizontal. Una vez alcanzada la profundidad deseada y finalizada su misión, la vejiga se llena nuevamente de agua o aceite, obteniéndose un mayor empuje y por tanto una flotabilidad positiva, provocando al *Glider* a salir seguidamente a superficie [28].

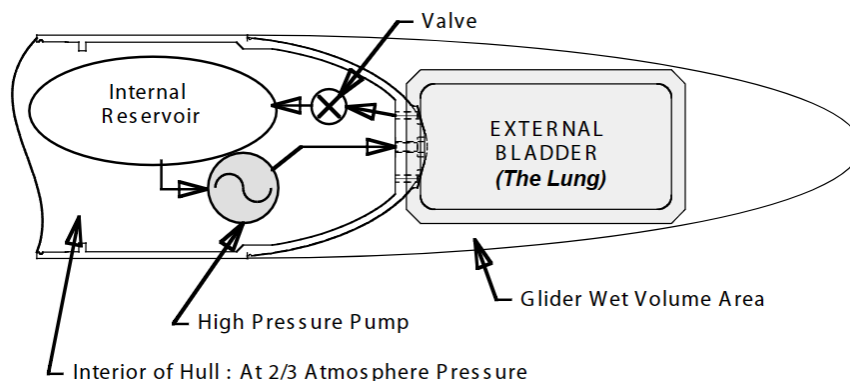


Figura 2-12 Aspecto del bloque tanque-vejiga del Glider [28].

Del mismo modo, en el proceso de ascenso a superficie, se produce una fuerza hidrodinámica en sus alas que le otorga la capacidad de avance horizontal. En resumen, se observa como el *Glider* submarino funciona de una manera muy similar a la de un planeador aéreo, el desplazamiento horizontal empleando la fuerza vertical del peso es favorecido por unas alas cuyo plano es paralelo al del avance deseado, y por lo tanto la fuerza de sustentación es perpendicular a este [28].

Es precisamente en el control del *Glider* en lo que se basa la idea fundamental de este proyecto, pretendiendo estudiar los diferentes movimientos internos de la masa del bloque de control, es decir, calibrar el bloque de control inercial del vehículo, para de tal manera obtener los ángulos de orientación y por tanto avance deseados del prototipo propuesto, en cualquier situación.

Atendiendo a la descomposición de fuerzas mostrada en la Figura 2-13, se puede apreciar como intervienen esencialmente dos componentes a la hora de controlar la navegación de un *Glider*. En este caso se trata de la fuerza de arrastre D y la componente energética L . De tal manera se crea un coeficiente de alta relevancia denominado relación (*Lift/ Drag*) que se puede emplear como referencia para medir la eficiencia en el avance de estos vehículos.

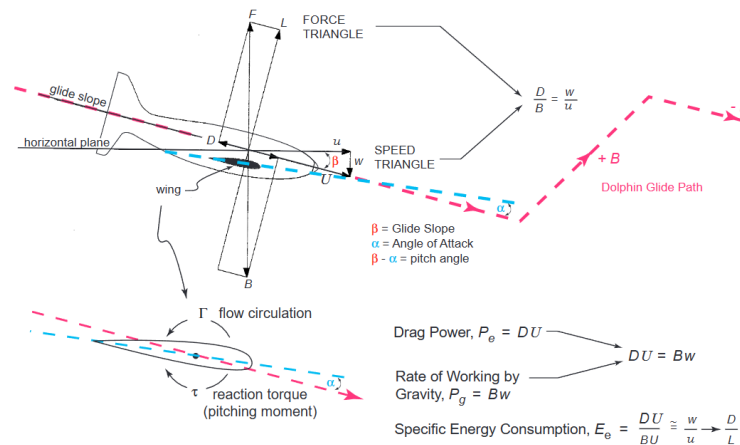
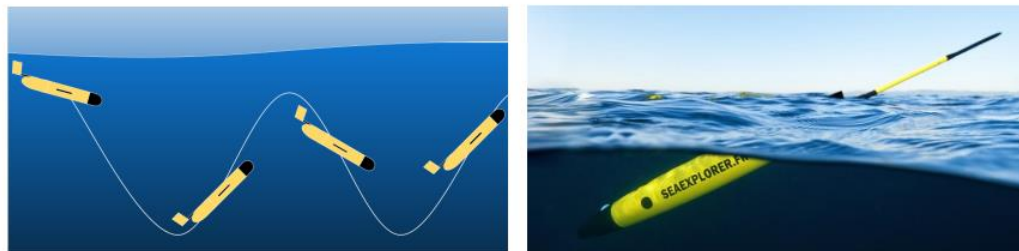


Figura 2-13 Descomposición de fuerzas que intervienen en el control de un AUV [28].

A continuación, en la Figura 2-14 se muestra un ejemplo simplificado del desplazamiento estándar de un *Glider*. Como se puede apreciar, el AUV tiene a seguir una trayectoria sinusoidal, barriendo de esta manera toda la columna de agua en la que opera desde la superficie hasta el suelo marino. Gracias a este movimiento, el planeador ahorra una gran cantidad de energía que se traduce en una mayor autonomía de incluso meses de duración.



(a) Trayectoria de diente de sierra seguida por el planeador [9]. (b) Planeador Seaexplorer cabeceando para orientar la antena durante la transmisión de datos [10].

Figura 2-14 Trayectoria estándar de un Glider submarino [28].

El coeficiente L/D mencionado anteriormente, se puede por tanto considerar representativo del avance horizontal que puede lograr el *Glider*, ya que cuanto mayor sea el valor de (L) , mayor será la velocidad y por tanto la eficiencia de planeo. Este efecto se logra a través del diseño de las alas laterales, y según su forma, las prestaciones que ofrecerán serán diferentes (Figura 2-15) (Figura 2-16) [29] [30].

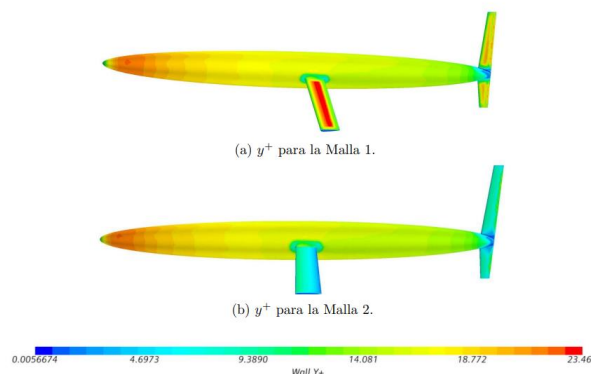


Figura 2-15 Estudio hidrodinámico de un Glider tipo Spray [29].

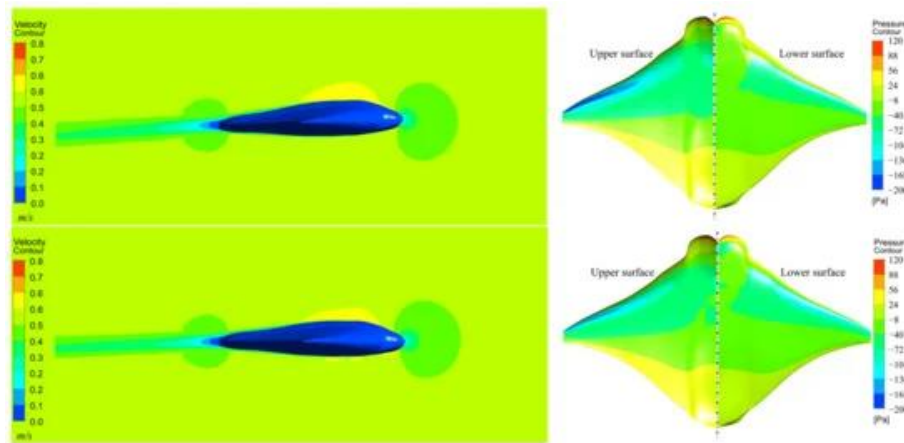


Figura 2-16 Estudio hidrodinámico de un Glider tipo Darpa Manta Ray [30].

Por otra parte, gran parte de estos vehículos posee la capacidad de ascender y descender en una misma columna de agua (2-D *Station Keeping*). Hablando en plata, esto se traduce en un AUV que puede lograr sumergirse, emerger y mantenerse quieto a una determinada profundidad conservando la misma latitud y longitud, lo cual es una característica muy interesante, ya que permite si se considera necesario emplearse y recogerse en un mismo punto. Para lograr este efecto, los vehículos describen círculos de pocos metros de diámetro, aprovechando la inclinación de sus alas para que el avance resultante sea el deseado (Figura 2-17) [31].

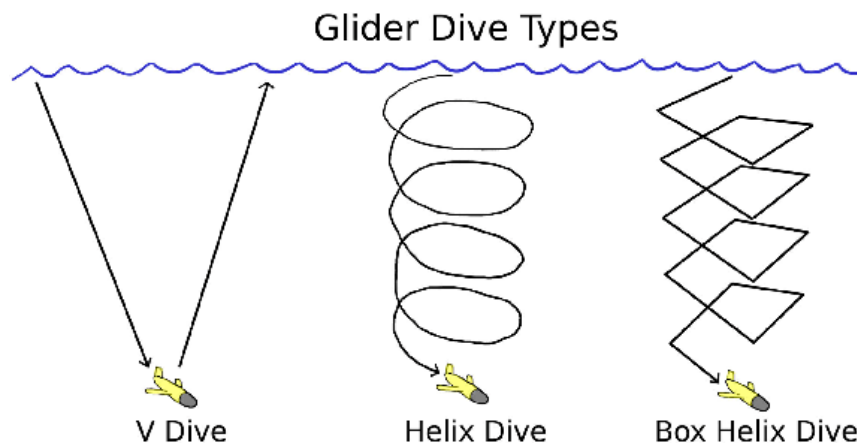


Figura 2-17 Inmersión estática vs Inmersión dinámica [31].

2.4.2.1 Energía, potencia y propulsión

El sistema encargado de sustentar al *Glider* de energía y potencia, es el mismo que limita dos parámetros fundamentales en la operación de este tipo de vehículos. Por una parte, la energía será la que determine la máxima capacidad de duración y alcance de la misión que el vehículo pueda desempeñar dentro de unos márgenes de seguridad. Lo normal es que estos sistemas de sustentación energética estén constituidos por baterías de litio, además de otros sistemas de control de carga y regulación de consumo energético. No obstante, también existen casos en los que se pueden emplear combustibles líquidos y pilas de combustible. En el caso particular de los *Gliders*, el sistema encargado de la energía y potencia del vehículo coincide con el sistema encargado de la maniobra de este, puesto que los AUV suelen modificar la posición que ocupan las baterías internamente dentro de su bloque para de esta manera variar el centro de gravedad del vehículo y poder favorecer el balanceo y cabeceo en la maniobra.

En cuanto a la propulsión de este tipo de vehículos, los *Gliders* se diferencian de sus hermanos ROV y AUV tipo torpedo al no propulsarse mediante un sistema de hélices accionadas por uno o varios motores eléctricos. Este tipo de vehículos, como se explicó en el apartado anterior, emplea como únicos

medios propulsores la inercia por movimiento interno del bloque de control, además de regularse por medio de sus alas. Esto se explicará más en profundidad en el apartado 3.3.

2.4.2.2 Navegación, control y comunicaciones

A diferencia de las plataformas que operan en la superficie, para los UUV entre los cuales se incluyen por supuesto los *Gliders*, el uso de sistemas de posicionamiento y navegación por GPS no es posible, pues la señal de estos se ve atenuada por el agua de mar. Como alternativa, los UUV proponen sistemas de posicionamiento inercial además de la navegación por estima de su deriva. Para ello hacen uso del efecto Doppler de la velocidad del sonido del agua, bien con respecto a posiciones conocidas del fondo marino, bien empleando posiciones relativas a ondas acústicas identificadas previamente [21]. Este método de control de navegación e inmersión es muy similar al mecanismo placa-péndulo empleado por los primeros torpedos utilizados varias décadas atrás por múltiples marinas mundiales incluyendo la Armada [32]. Uno de los primeros casos conocidos en hacer uso de este mecanismo son los torpedos alemanes empleados en la Segunda Guerra Mundial del modelo G7 (Figura 2-18), responsables del hundimiento de innumerables buques y convoyes del bando aliado [33].



Figura 2-18 Torpedo alemán G7 [33].

2.4.3 Cuerpo de un Glider

El cuerpo o estructura de un *Glider* está compuesto por varios componentes principales que desarrollaré a continuación (Figura 2-19) [34]:

- La vejiga: pequeño almacén reservado para lastrar de agua/aceite o en su defecto vaciarla para variar la flotabilidad del *Glider*.
- Las aletas y timón: son las encargadas de regular el ángulo de balance y cabezada del vehículo, además de otorgar otras propiedades hidrodinámicas.
- El sistema de sustentación de energía: bloque que del que dependerá la autonomía del *Glider*, definiendo su máximo tiempo de operación y alcance.
- Sistema de navegación: donde se dispone el sistema de navegación, en este caso inercial, del vehículo.
- Los sensores: estos serán los que definirán la misión para la que estará capacitada el *Glider* que los porte, según su naturaleza.
- La bahía de la ciencia: bloque encargado de controlar el correcto empleo de los sensores cuando sea necesario para cumplir la misión.

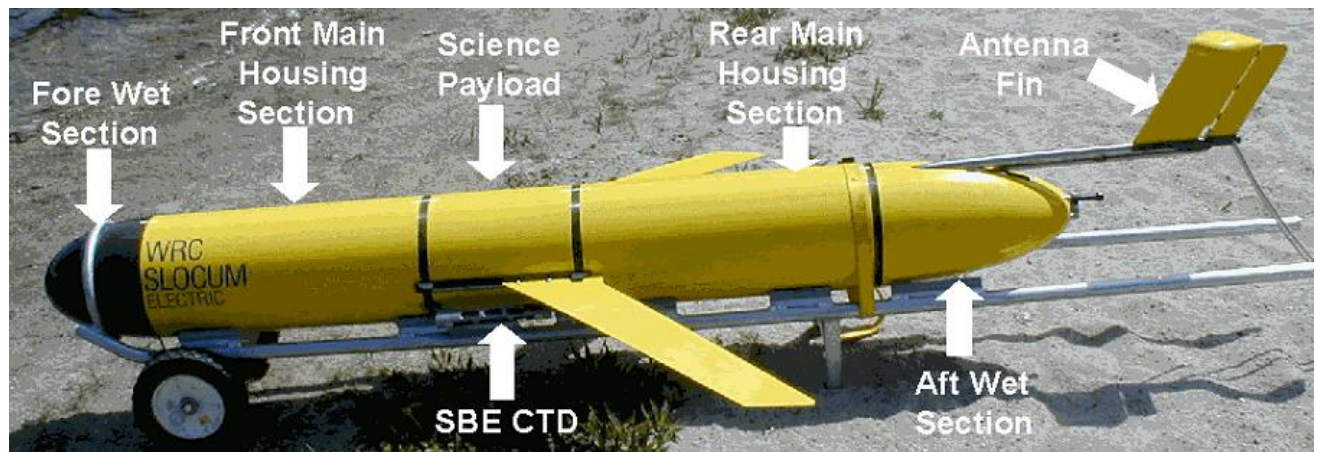


Figura 2-19 Estructura general de un Glider [34].

Como se ha expuesto anteriormente, el *Glider* posee una vejiga la cual se puede llenar con aceite o con agua indistintamente para variar la flotabilidad del Glider en su periodo de navegación. Esta variación supone un movimiento vertical que las alas aprovechan para convertir en movimiento en el plano horizontal. La posición de la vejiga dentro del Glider también es un factor influyente para la maniobrabilidad y control de movimiento del dron. En caso de que se quiera priorizar por ejemplo el equilibrio del AUV, la vejiga se colocará en proa, ya que es la parte delantera la que primero y mejor se direcciona a donde se desea. En cambio, si se desea facilitar la capacidad de establecer comunicaciones, interesará más asegurar el levantamiento de la parte trasera, para que las antenas emerjan totalmente de la superficie, y por tanto se situará ahí la vejiga.

2.4.4 Características y atributos

A continuación, se enumerarán y se desarrollarán brevemente las características más relevantes a destacar de este tipo de vehículos, para ofrecer una visión de cómo se encuentran en estos momentos de avanzados tecnológicamente estos vehículos. Comenzaremos a resaltar las capacidades más positivas y que suponen un factor diferencial en comparación a su competencia (submarinos, buques, etc.).

- En primer lugar, ya que se ha hecho tanto hincapié en la sorprendente autonomía y alcance que poseen estos vehículos, vamos a arrojar un poco más de luz sobre este asunto, dando algunos datos numéricos. Actualmente, la media en cuanto a la autonomía de los *Glider* existentes ronda los 1000 km. Sin embargo, ya existen algunos prototipos capaces de superar los 1500 km de alcance, traduciéndose en una autonomía de hasta 6 meses.
- Durante todo su periodo de permanencia en las profundidades, como se ha expuesto previamente, los *Glider* describen una carrera de forma sinusoidal, para de esta manera intentar abarcar el máximo área de estudio posible. En la actualidad, estos vehículos pueden abarcar desde cota de superficie hasta una profundidad máxima operativa superior a los 3000 m, aunque al igual que en el punto anterior, dependerá del modelo.
- En cuanto a sus características físicas, el tamaño medio de los AUV ronda unos 2 m y poseen una masa de alrededor de los 50 kg [26].
- En cuanto a los costes y tiempo de producción, se puede comprender como en este campo el *Glider* se convierte en una alternativa muy atractiva en comparación con la decisión de optar por la construcción de buques y submarinos convencionales. Concretamente, para un *Glider* cuyas medidas se asemejen a las mencionadas en el punto anterior, el precio ronda unos 50000 €, mientras que el proyecto de construcción de un submarino puede alcanzar los cientos de millones. Coste que por supuesto se verá condicionado por la complejidad de los sistemas que se encuentren en el bloque de la ciencia de este. En lo relativo al tiempo

de producción, también dependerá de la complejidad de sus sensores, sin embargo, no hay duda de que también es muy inferior.

A continuación, analizaré aquellos atributos en los cuales el *Glider* aun no destaca y que suponen una desventaja de cara a su comparación con otras plataformas, y que serán por tanto aquellos puntos débiles en los que más se tendrá que invertir en mejorar de cara a un futuro para poder alcanzar la máxima eficiencia y eficacia operativas:

- En primer lugar, lo que más salta a la vista es la poca velocidad que estos vehículos pueden alcanzar en la actualidad. Es cierto que se debe principalmente a que muchos de los prototipos de *Glider* empleados, especialmente para mantener su sigilo, no poseen un motor de propulsión, por lo que su velocidad de crucero oscila entre 1 y 3 kts.
- El hecho de no incorporar un sistema de propulsión por hélice también repercute en otros aspectos, como son la capacidad de maniobrar rápidamente en caso necesario o tener mejor control sobre el vehículo en navegación. Un ejemplo muy claro en el que se acentúa mucho esta carencia es en la incapacidad de los *Glider* de navegar a cota constante, es decir, paralelo a la superficie del agua (plano horizontal). Asimismo, pierden otra capacidad en cuanto a su habilidad estudiar el entorno marino, ya que al no poder mantenerse navegando en un plano recto, tareas como analizar el fondo marino, o buscar un contacto en un determinado entorno se convierten en una tarea muy complicada de cumplir. No obstante, existen hoy en día algunos casos de planeadores los cuales, sí que incorporan una ayuda de propulsión por hélice, aunque a cambio deben sacrificar gran parte de su autonomía.
- Haciendo referencia a su capacidad de realizar tareas de forma autónoma, a pesar de que en muchos aspectos esto puede resultar ser algo muy positivo, también hay que comprender de que puede suponer ser un factor limitante en algunas ocasiones, como es el ‘factor sorpresa’. En cualquier navegación, especialmente si se trata de una con motivos militares, ya que la intensidad del escenario suele ser superior a lo normal, la posibilidad de encontrarse con alguna situación inesperada que requiera un cambio de planes es una baza con la que siempre hay que contar. Al perder factor humano en el empleo de los *Gliders*, la incapacidad de estos vehículos para tomar decisiones en caliente cuando se topan con situaciones inesperadas puede resultar en una operación fallida, además de por supuesto la pérdida del AUV.

2.4.5 Proyección futura

En resumen, de todo lo mencionado anteriormente, se puede concluir que el *Glider* es un vehículo que destaca por su alta eficiencia energética a la hora de desempeñar misiones durante largos periodos de tiempo, además de poder reservar una gran cantidad de energía disponible para el uso de sensores y el control del vehículo durante su desplazamiento. De tal manera, de cara a enfocar posibles líneas futuras de este novedoso tipo de AUV surgen diferentes opciones como pueden ser mejorar la estructura, en el bloque de sustentación energético o ampliar el margen operacional, buscando la eficiencia y equilibrio entre las dimensiones del *Glider* sin perder sus mejores capacidades (la autonomía y el factor de sigilo) que no proporciona ninguna otra plataforma de la actualidad en el ámbito militar, ni siquiera los submarinos.

En cuanto a las mejoras en la estructura, en este ámbito las mejoras siempre suelen ser las menos notorias, ya que antes de construir el prototipo definitivo, se lleva a cabo un estudio muy exhaustivo de la hidrodinámica del vehículo para que no influya negativamente en sus prestaciones una vez desplegado. Sin embargo, la construcción de AUV, al ser tan novedosa, podría considerarse como una prueba de tipo ‘ensayo-error’, ya que, al estar tan poco trabajada, una nueva implementación inesperada puede influir tanto negativamente como sorprendentemente a bien. La estructura podría verse mejorada de diferentes modos:

- A través del diseño de las alas (alas más grandes que ofrecen más resistencia contra el agua, pero también más estabilidad). Este es el método que se cree que más puede influir en el desplazamiento y por tanto en la versatilidad del *Glider*. Este sin duda es uno de los aspectos que más puede preocupar de cara a su participación en escenarios de alta intensidad, ya que por su ausencia de propulsión motorizada, las velocidades máximas que se han logrado alcanzar son de 1 a 3 kts [5].
- A través del perfeccionamiento de la forma del casco. Por ejemplo, una geometría con una proa más agresiva o puntiaguda favorecerá el avance, sin embargo, si se plantea mal puede influir negativamente en el volumen del aparato permitiendo que quepan menos sistemas de detección o que el bloque de sustentación energético sea más pequeño, disminuyendo la autonomía.
- A través de cambios en el bloque de control de flotabilidad, donde se encuentra la vejiga del AUV.

Las mejoras en el bloque energético se pueden plantear de dos maneras. La primera, y aparentemente más sencilla sería el dedicar más espacio del cilindro a la instalación de baterías y motores eléctricos, repercutiendo inevitablemente en la pérdida de espacio para otros sensores, aunque mejorando la autonomía, o en su defecto aumentar el tamaño del AUV, perdiendo capacidad de sigilo. Por otra parte, la que parece la solución más razonable, sería a través de la propia mejora de los sistemas de sustentación mediante la investigación de alternativas energéticas renovables, o incluso el aprovechamiento de las mareas, el sol y el viento como opciones de generación de energía. No obstante, la realidad es que estas fuentes aun no son viables hoy en día, por lo menos de manera rentable.

Otra línea de mejora clara, y lo que para muchas marinas supone un factor determinante a la hora de inclinar la balanza hacia la decisión no invertir en este tipo de vehículos, es la complejidad en las comunicaciones. Este problema es el mismo que poseen otras plataformas como los submarinos, los cuales deben ascender a cota periscópica y en definitiva hacerse vulnerables, para poder establecer comunicaciones con cierta calidad. Extrapolado a los *Glider*, si sumamos esto al hecho de que su velocidad de operación, tanto para sumergirse como para emerger, es minúscula, uno se da cuenta de que el proceso de intercambio de información entre el AUV y una estación externa puede suponer periodos de tiempo muy elevados, que se traduce en una pérdida de tiempo para seguir explorando las profundidades. Se trata sin duda de unos de los aspectos en los que más puede mejorar la eficiencia de cara al futuro.

Por último, se propone como posible línea de mejora la versatilidad de los *Glider*, de cara a que puedan participar en el mayor número de misiones posibles para de esta manera no exponer a seres humanos al peligro. Probablemente esta línea de mejora sea la de más lenta evolución, y sin lugar a duda la más ambiciosa, ya que depende directamente de las dos anteriores, además de otros muchos factores. Sin embargo, sí que se plantea como una posibilidad el empleo de estos pequeños y discretos vehículos con fines bélicos por la ventaja de discreción que poseen. Dicha versatilidad en el ámbito operacional se podría lograr de una manera parecida a la que en su día se idearon los patrulleros de litoral americanos (*Litoral Combat Ship*) los cuales estaban ideados desde un primer momento como buques con módulos intercambiables para poder enfrentarse a diferentes operaciones, ya fuesen antiaéreas, antisuperficie o antisubmarinas. Algo del estilo se podría plantear con algunas de las piezas de los *Glider*, como el cambio de sensores instalables en el bloque principal o distintos tipos de alas según la autonomía requerida para una misión según su naturaleza.

No obstante, si hay algo claro en la actualidad es que existen mejoras básicas en el funcionamiento básico que aún no se han resuelto, como son la operabilidad en ámbitos de alta densidad de tráfico, ya que al subir el *Glider* a la superficie podría chocar con un casco o hélice de un buque en navegación quedando fácilmente inoperativo, así como chocar con el fondo marino en alguna zona de desnivel inesperado; por lo que el uso de estos dispositivos para motivos de guerra quedará para más adelante. Y es que para poder asumir este nuevo tipo de cometidos, estos vehículos deberán refinar, para

empezar, sus sistemas de detección, ya sea incluyendo cámaras que funcionen bajo el agua para detección visual por imagen (algo similar a la capacidad que portan algunos misiles), o mediante la inclusión de sonares activos y pasivos, además de arrays medidores de la variación del espectro electromagnético para detección de blancos tanto en la superficie como bajo esta.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

3.1.1 Soporte del cilindro

Lo primero que se requería para sostener el cuerpo del cilindro era una estructura, idealmente un paralelepípedo, donde poder hacer firme los hilos del péndulo bifilar y adherir los sensores que posteriormente nos serían útiles para tomar medidas y analizar el movimiento del cilindro con diferentes tipos de software. Las medidas del volumen escogidas para soportar el cilindro fueron 200x200x300 mm, con un orificio de 120 mm de diámetro en medio para poder encajar sin holguras el cuerpo del cilindro, con el fin de evitar vibraciones durante los ensayos.

En este caso, para ahorrar en costes de producción se optó por construir un soporte de MDF, diseñado previamente con el software *AutoCAD*, y posteriormente extruida mediante una cortadora láser sobre una plancha de 7 mm de grosor de dicho material. El MDF o fibrapán es un material hecho a base de diferentes fibras de madera con propiedades muy similares, siendo ligeramente más frágil. Al igual que la madera, se trata de un material idóneo para llevar a cabo piezas artesanales por su bajo coste y facilidad de trabajo.

Posteriormente, para la unión de todas las piezas y con el fin de fracturar la madera lo menos posible, se optó por unir las piezas mediante escuadras de 15x15 mm, que serían fijadas mediante clavos a las planchas. Estas se diseñaron con software CAD, en este caso *Inventor*, para ser finalmente extruidas empleando impresión 3D en material PLA, haciendo falta un total de 16 unidades (Figura 3-1).

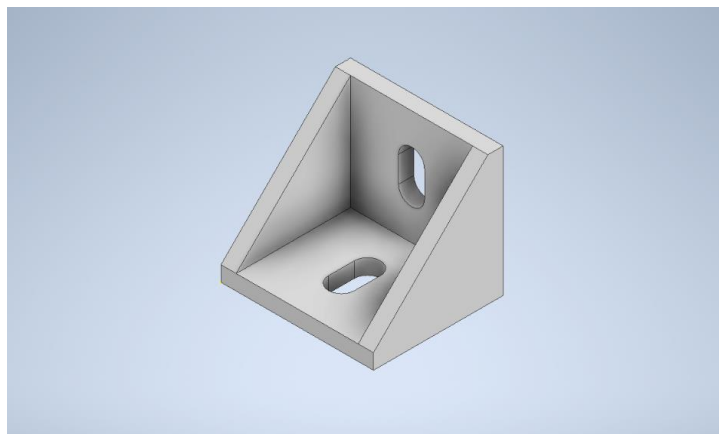


Figura 3-1 Diseño en *Inventor* de escuadras de unión (autoría propia).

Después de tener todos los componentes, ya solo quedaba montar el soporte (Figura 3-2). En él se pueden apreciar la presencia de otros componentes esenciales para el desarrollo del proyecto, como son el acelerómetro situado en la cara superior, y las dianas situadas sobre los 4 vértices de la cara frontal que servirán como punto de seguimiento para analizar el balanceo con el software *Tracker*.



Figura 3-2 Soporte de madera (autoría propia).

3.1.2 Soporte principal de aluminio

A continuación, después de construir un soporte con la forma y características adecuadas para encajar cilindro, instalar los sensores necesarios y en definitiva hacer de grúa para el cuerpo del *Glider*, hacía falta construir el soporte de todo el montaje, el *banco de ensayos* (Figura 3-3).

Para ello, se decidió optar, por cuestiones de presupuesto y facilidades, por perfiles de aluminio de diferentes longitudes con un grosor 40 x 40 mm. De nuevo con el objetivo de construir un banco de ensayos que fuese lo más favorable para tomar medidas, priorizando estabilidad, robustez y evitar vibraciones en el balanceo del péndulo, se optó por una estructura con forma de cubo, la cual se diseñó con un software de la empresa *Bosch Rexroth* que se desarrollará en el título 3.2.4 del proyecto.

Gracias a este programa, se logró evaluar que piezas serían necesarias para la unión de los perfiles. En este caso se decidió adquirir escuadras, esta vez de aluminio, como mejor opción para la unión de los perfiles y cuyas características serán analizadas en los anexos. Finalmente, las medidas del soporte fueron las de un cubo de 2 x 2 m, con una barra adicional transversal en la cara superior, de donde cuelgan los hilos que soportarán al péndulo en la posición central, regulando su altura mediante unos guías de cabos impresos en 3D además de unas roldanas.



Figura 3-3 Banco de ensayos (autoría propia).

3.1.3 Fondo cromado

Con el fin de realizar los ensayos y las grabaciones de estos en el medio más homogéneo posible, además de facilitar el seguimiento con el *Tracker* de los puntos clave del soporte de madera durante el balanceo, se decidió optar por establecer un fondo con lonas de colores cromados lisos (Figura 3-4). Para ello habrá que tener en cuenta que los colores de los componentes que se pretenden analizar, ya que, sino la cámara puede no diferenciar unos componentes de otros, perdiéndose calidad y capacidad de análisis durante el seguimiento.



Figura 3-4 Fondo cromado para ensayos (autoría propia).

Teniendo esto presente, el uso del croma puede tener muchos beneficios si se emplea correctamente. Se trata de una técnica audiovisual que se emplea ampliamente en el ámbito de la fotografía para extraer un color de una imagen y reemplazar el área que esta ocupaba por otra imagen. Para su uso, el croma deberá estar perfectamente iluminado, a ser posible con una iluminación uniforme en el fondo, además de la iluminación del sujeto de estudio, procurando que no haya sombras para que cuando importemos el video grabado a nuestro programa de análisis (en este caso el *Tracker*) no haya lugar a confusión entre fondo y componentes del sujeto a analizar.

3.1.4 Material de extrusión

Para posibilitar la impresión de piezas mediante las impresoras 3D y el software correspondiente, así como obtener las propiedades requeridas de una pieza fabricada por extrusión de material, es muy necesario tener en cuenta que tipo de material se emplea en el proceso de fabricación. El filamento que se calienta y se va poco a poco extruyendo sobre la placa base de la impresora en este caso se obtiene de una bobina hecha de ácido poliláctico, también denominado PLA. Este proviene de una derivación de materias primas naturales, perteneciente a la familia de los poliésteres, lo que lo hace biodegradable además de ofrecer una buena relación calidad-precio y no requerir de temperaturas demasiado elevadas para ser trabajado; lo que lo convierte en un material adecuado para la fabricación de prototipos.

Por esta razón, este es el material que ha predominado en el proceso de fabricación del recubrimiento de los diferentes bloques del interior del cilindro, así como otras piezas auxiliares como son las escuadras de unión, presentadas en el apartado 3.1.1, así como el soporte del acelerómetro para poder adherirlo al soporte de madera, sin dañarlo, en el punto ideal para tomar las medidas pertinentes (Figura 3-5).



Figura 3-5 Soporte del acelerómetro extruido en PLA (autoría propia).

3.1.5 Sistema de péndulo

Para la elaboración de este sistema hicieron falta dos materiales principalmente. En primer lugar, ya que el experimento se desarrollará en base a un péndulo bifilar, harán falta dos cabos. En este caso se escogieron de *dyneema* por su resistencia a la flexibilidad a la hora de colgar pesos de ellos (Figura 3-6).



Figura 3-6 Cabo de dyneema por roldanas (autoría propia).

Por otro lado, para asegurar que la tensión recibida por ambos hilos fuese la misma, es decir que soportasen el mismo peso, y por ende el soporte se encontrase en condiciones de equilibrio estable en el instante inicial, harían falta unas roldanas por las cuales encauzar dichos cabos de *dyneema*.

3.1.6 Sistema de pesos calibrados

Con el fin de llevar a cabo el cálculo del CG del cilindro en las diferentes posiciones de la masa del bloque de estabilidad, se ha recurrido a un sistema de pesos calibrados, el cual se colocará en uno de los extremos del soporte de madera, provocando un efecto de cabeceo en el cuerpo del *Glider* y simulando las diferentes posiciones de la masa del bloque. Para simular los cambios de posición, se irán añadiendo y retirando pesos en función del grado de cabeceo que se pretenda conseguir, para analizarlo con los sistemas y software pertinentes (Figura 3-7).



Figura 3-7 Sistema de pesos calibrados (autoría propia).

3.1.7 Cortadora láser LP1060

Se trata de un equipo cuya finalidad es cortar materiales, desde madera hasta cristal o cerámica, con un elevado nivel de precisión por medio de CO₂ y un puntero láser de grosor variable (Figura 3-8).

El material que se pretende cortar debe ser depositado en la placa de corte (1000 x 600 mm), la cual se encarga no solo de soportar el material, sino también de controlar la extracción de humos provocados durante el corte, además de controlar el consumo de energía del equipo. Trabaja con potencias láser de 100 W y gracias a que es capaz de regular el grosor del puntero, alcanza precisiones de corte de hasta 0,1 x 0,1 mm.

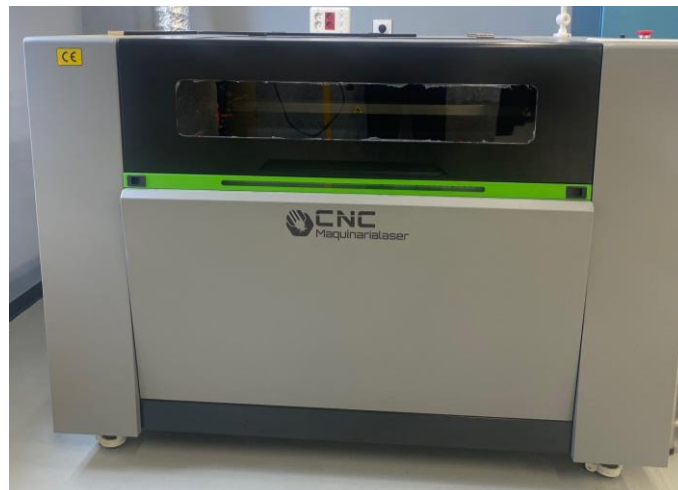


Figura 3-8 Cortadora láser LP1060 (autoría propia).

En este proyecto, la cortadora láser se empleó para recortar las caras del soporte del cilindro de una plancha de madera.

3.1.8 Impresora 3D Ultimaker 3

Al igual que los demás modelos de impresoras 3D, *Ultimaker 3* destaca por su capacidad de extruir piezas, a través de planos, mediante la deposición de filamento recalentado sobre una placa base. La ventaja que este modelo presenta frente a sus homólogos es su doble cabezal, lo que permite configurar dos materiales de extrusión además de distintos niveles de calidad según el nivel de detalle y/o relleno que requiera una pieza o parte de ella, sin ser para ello necesario el parar la impresión para efectuar dichos cambios manualmente. Otra característica que destacar, es la posibilidad de poder importar

planos directamente desde un dispositivo USB, por lo que no precisa de ningún software de adaptación externo para imprimir una pieza (Figura 3-9).

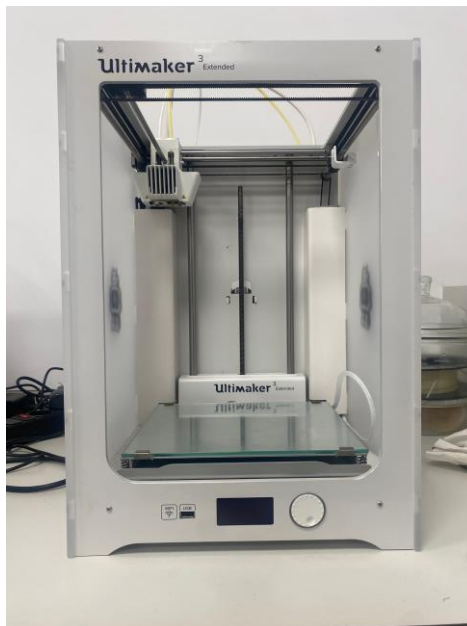


Figura 3-9 Impresora 3D Ultimaker 3 (autoría propia).

En este proyecto, se empleó la impresora 3D como utensilio para producir numerosos componentes como las escuadras del soporte de madera o el soporte del acelerómetro por un coste muy inferior al que hubiese supuesto comprarlos o fabricarlos por otros métodos.

3.1.9 Cámara Logitech Carl Zeiss Tessar 1080p

Con el fin de filmar todos los ensayos para posteriormente poder analizarlos con el software Tracker, fue necesario hacer uso de una cámara con ciertas capacidades de video (Figura 3-10). En este caso se optó por una cámara de alta definición capaz de generar *Frames* a 60Hz que era suficiente para obtener grabaciones de buena calidad y llevar a cabo la medición con exactitud. Hay que destacar que para el correcto empleo del dispositivo es recomendable tener acceso a un trípode o método de sujeción para que todas las mediciones se tomen desde una perspectiva estable y similar, con el fin de que el ajuste de escalas en el software de análisis sea el óptimo [35].



Figura 3-10 Logitech Carl Zeiss Tessar HD 1080p [35].

3.1.10 Acelerómetro WT901blecl5.0

El acelerómetro o clinómetro *WT901blecl5.0* es el sistema y sensor principal de este proyecto. Se trata del elemento que ha facilitado la obtención de todos los datos y mediciones necesarios, con el fin de realizar los cálculos pertinentes para el correcto desarrollo de este (Figura 3-11) [36].



Figura 3-11 WT901blecl5.0 [36].

Este aparato multi-sensor de pequeño tamaño, se opera mediante *Bluetooth 5.0*, detectando aceleración, velocidad angular, ángulos de inclinación e incluso las variaciones de campo magnético a su alrededor. Es por ello por lo que recibe un tripe título: acelerómetro, giróscopo y gaussímetro. Además, destaca por la elevada precisión y tasa de refresco con la que es capaz de medir dichos parámetros:

SENSOR	MEDIDA	TASA DE REFRESCO	PRECISIÓN
Acelerómetro	Posición en 3 ejes (x, y, z)	10 Hz	0,01g
Clinómetro	inclinación en 3 ejes (x, y, z)	10 Hz	Balance y cabezada 0,2°

Tabla 3-1 Propiedades del acelerómetro.

En lo referente a como está calibrado este dispositivo cabe destacar, que el sistema de coordenadas en el que se basa para ubicarse tiene el ángulo de actitud referenciado al noreste, por lo que sigue el mismo sistema de coordenadas que el que se una en la aviación (Figura 3-12). Por otra parte, el giro positivo ocurre en el sentido contrario de las agujas del reloj, y la posición de partida inicial deberá ser la siguiente:



Figura 3-12 Calibración del WT901blecl5.0 [36].

Para el empleo de este sistema, basta con conectarse a él por medio de *Bluetooth* versión 5.0 (compatible con dispositivos *Android*, *IOS* y *Microsoft*). Para ello, con la compra de este dispositivo,

el propio embalaje trae consigo un *Dongle Bluetooth 5.0*, para permitir la conexión a cualquier dispositivo que no disponga de *Bluetooth* propio y posea un puerto USB al que conectar el enlace *Bluetooth* por *USB*.

Asimismo, se deberá instalar el software asociado, perteneciente a la empresa fabricante del sensor, cuya sencilla e intuitiva interfaz facilitan enormemente la recolección masiva de datos. Esta será explicada con mayor detenimiento en el apartado 3.2.7.

3.2 Software empleado

En este apartado se definirán los diferentes tipos de software empleados para posibilitar el desarrollo del proyecto.

3.2.1 Autodesk

El Software de Autodesk lo conforman un conjunto de programas, lo cuales tienen como factor común el diseño de piezas en 2 y 3 dimensiones. Fue desarrollado por una empresa con sede y origen en los Estados Unidos para el diseño de dibujos técnicos detallados para industrias de manufacturas, infraestructuras, construcción, etc. Una de las principales ventajas de trabajar con este tipo de Software, es la interoperabilidad entre sus diferentes aplicaciones y programas. Por ejemplo, un diseño en 2D, generalmente realizado en la plataforma de *AutoCAD* por su gran capacidad de elaborar planos por su mejor optimización, permite posteriormente ser exportado al programa *Inventor* para extruirlo para realizar extrusiones.

Dentro del amplio catálogo de programas que ofrece *Autodesk*, son *AutoCAD* e *Inventor* los programas de los que se ha hecho uso en este proyecto.

3.2.1.1 AutoCAD

Como se ha expuesto en el apartado anterior, el software *AutoCAD* es idóneo para realizar diseños de dibujos técnicos de precisión, además de otras labores como puede ser la elaboración de los planos necesarios para la fabricación de una pieza.

Entre las múltiples opciones que ofrece este programa, cabe destacar la posibilidad de trabajar piezas por capas. De tal manera, lo que el usuario logra mediante la ocultación de capas, es poder ir modificando una pieza por partes y fases, permitiendo corregir errores cometidos al comienzo del diseño sin para ello ser necesario repetir todo el proceso desde el principio.

Para este proyecto, otra capacidad a destacar de este programa es la gran interoperabilidad que mostró con el software de la cortadora láser. Concretamente, permite exportar diseños a dicho programa, sin necesidad de escalar ni ajustar, para ser posteriormente grabados en planchas de una amplia gama de materiales. En este caso, para ahorrar en costes de producción se optó por recortar el diseño de un soporte sobre una plancha de madera con 7 mm de espesor (Figura 3-13).

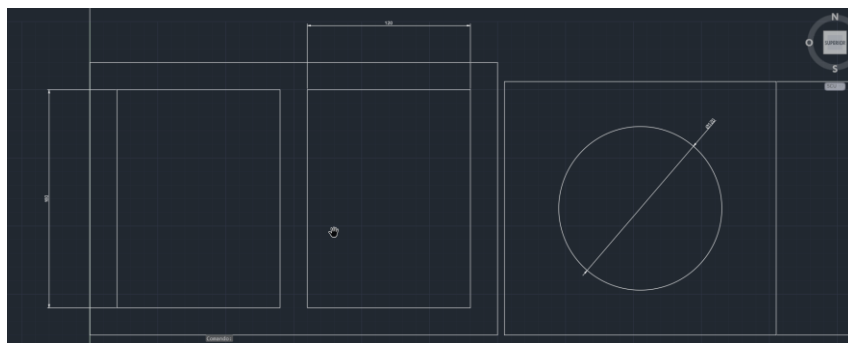


Figura 3-13 Diseño CAD del soporte del cilindro (autoría propia).

Otra utilidad que se le dio a este software fue la de hallar gráficamente la posición longitudinal de los centros de gravedad del *Glider* en las diferentes posiciones de la masa del bloque de control (Figura 3-14).

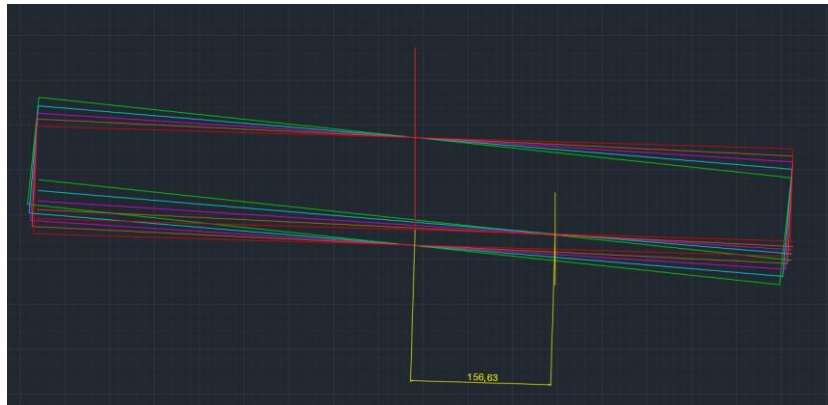


Figura 3-14 Solución gráfica de la coordenada longitudinal CG (autoría propia).

3.2.1.2 Inventor

A diferencia de *AutoCAD*, que está centrado en el diseño en un único plano de 2D, *Inventor* da un paso más allá permitiendo, partiendo de una silueta en 2D, extruir este diseño para convertirlo, mediante diferentes técnicas, en un sólido en 3D. Sin embargo, a pesar de ser compatible con *AutoCAD*, podemos observar que *Inventor* no es un programa CAD, puesto que es el propio programa el que en este caso realiza de forma automática la actualización de geometrías al alterar una dimensión predeterminada en una de las capas. Gracias a este software se han podido obtener las piezas que conforman los diferentes bloques del interior cilindro. Primeramente, a través de la extrusión de planos de *AutoCAD*, y posteriormente se les fue ido añadiendo algunas particularidades que requería cada una por la dificultad que supone incluirlos partiendo desde un único plano 2D inicial.

Asimismo, *Inventor* tiene la capacidad de realizar ensamblajes para la visualización final de un conjunto de piezas. Ya que estamos ante un programa tipo CAE, hay que tener en cuenta que este programa también permite realizar análisis de elementos finitos. Concretamente, esto se traduce en la posibilidad de, mediante la asignación de un material a un sólido 3D diseñado, realizar diversos análisis y estudios de resistencia, fuerzas aplicadas, hidrodinámica, etc., que pueden servir de utilidad para comprobar si la pieza diseñada cumplirá con los requisitos necesarios para la función que desempeñará en la vida real.

En este proyecto, este programa se ha empleado con el fin de diseñar ciertos elementos de unión y auxiliares para el banco de ensayos impresas en impresora 3D (Figura 3-15).

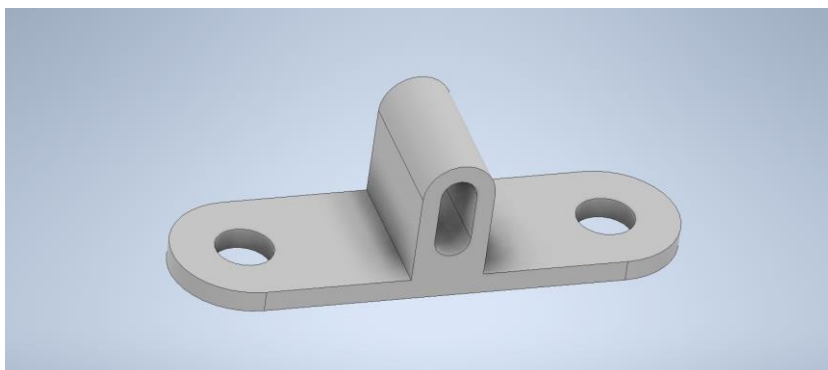


Figura 3-15 Diseño del guiador de cables del péndulo (autoría propia).

3.2.2 RDWorksV8

RDWorks v8 o LaserworksV8 es un ejemplo de sistema de grabado controlado por computadora. Se corresponde con el software que emplea la cortadora láser LP1060, y tiene como principal ventaja la capacidad de importar archivos CAD para el grabado sobre planchas de diferentes materiales. Además, permite jugar con numerosas configuraciones avanzadas como son el grosor del puntero láser, la velocidad de corte, etc., con el fin de poder trabajar materiales de diferentes densidades y planchas de diferentes grosores. Por otra parte, como se muestra en la Figura 3-16, tanto el software como la cortadora cuentan con un sistema de grabado centrado en un eje de coordenadas, por lo que habrá que ajustar los diseños a grabar previamente a ser cortados en función del tamaño de la plancha a recortar.

En resumen, este software ha sido empleado para la importación y grabado de las diferentes partes del soporte de la tubería de metacrilato sobre la plancha de madera de 7 mm de grosor.

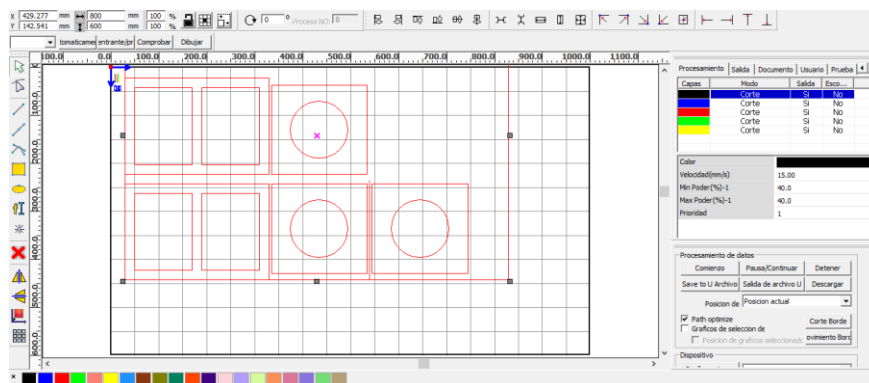


Figura 3-16 Interfaz software RDWorks (autoría propia).

3.2.3 Ultimaker Cura

Ultimaker Cura es un software empleado para la impresión de piezas mediante impresoras 3D. Lo realmente interesante de este software es que permite la importación de archivos CAD/CAE externos, por lo que es compatible con los programas de diseño de *Autodesk* empleados (Figura 3-17).

Este software posee una interfaz muy intuitiva en la cual se pueden modificar algunos parámetros que afectarán a la impresión, así como a algunas características de la pieza. Además, se puede previsualizar y comprobar el proceso de impresión de una pieza antes de ser físicamente impresa mediante la opción *SLICE*, que genera un corte de la pieza en capas, ofreciendo una estimación del tiempo de impresión junto a la cantidad de material que se va a consumir. Los ajustes de impresión ofrecen la posibilidad de realizar una adaptación cómoda a las necesidades de cada impresión, pudiendo modificar temperaturas, nivel de relleno de capas y paredes, soportes, velocidades de impresión, etc.

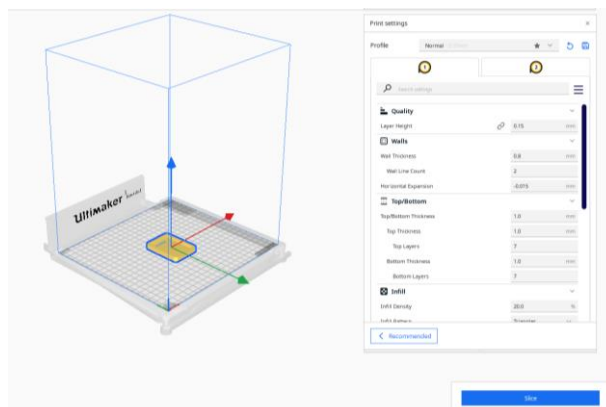


Figura 3-17 Proceso de impresión 3D en Ultimaker Cura (autoría propia).

Para este proyecto, el programa *Ultimaker Cura* ha servido para imprimir algunas de las piezas necesarias para el bloque de control, así como soportes para alguno de los sistemas de medición.

3.2.4 Bosch Rexroth MTpro64

MTpro64 es un programa perteneciente a la compañía *Bosch Rexroth*, ideado para planificar sistemas de montaje desde la selección de perfiles y piezas y su configuración, hasta el pedido de componentes. De esta manera se consigue realizar el montaje de estructuras mediante piezas del catálogo de *Bosch Rexroth*, además de previsualizarlo, permitiendo conocer con exactitud el número y tipo exacto de piezas que habrá que comprar para el montaje que se quiera construir.

Así como otros softwares presentados anteriormente, *MTpro* tiene la ventaja de ser compatible con *software CAD*, por lo que se puede, una vez construida una determinada estructura, importar a Inventor (por ejemplo) y realizar sobre ella ciertos análisis para comprobar que aguantará los esfuerzos a los que se le someterá en la vida real.

En el caso de este proyecto, este *software* se ha empleado para previsualizar el montaje del banco de ensayos, así como escoger aquellos perfiles que serían más idóneos para llevar a cabo el experimento y soportar, sin vibraciones, el movimiento de péndulo del cilindro (Figura 3-18).

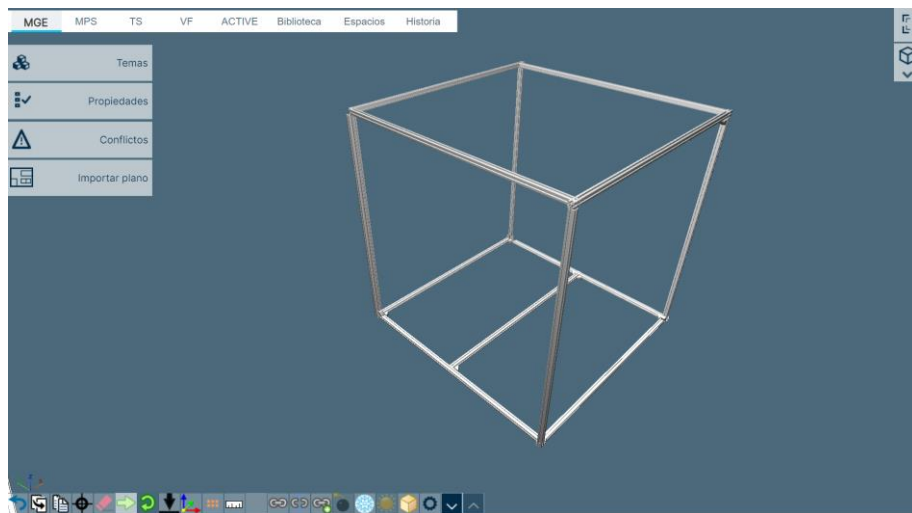


Figura 3-18 Montaje banco de ensayos en MTpro (autoría propia).

3.2.5 Logitech Capture

Logitech Capture es un software de edición de video desarrollado por la empresa *Logitech* que se encuentra enmarcado en la categoría de software multimedia. Con este programa, los usuarios podrán grabar, editar y compartir videos de alta calidad fácilmente (Figura 3-19).

Una de las principales características de *Logitech Capture* es su capacidad de grabar videos de diversas fuentes, como son cámaras web y cámaras externas. Los usuarios podrán regular la resolución y velocidades de cuadro para garantizar una velocidad de video óptima. Además, el software ofrece otras configuraciones avanzadas como el enfoque automático, exposición y corrección de color, lo que permite a los usuarios ajustar sus grabaciones de video.

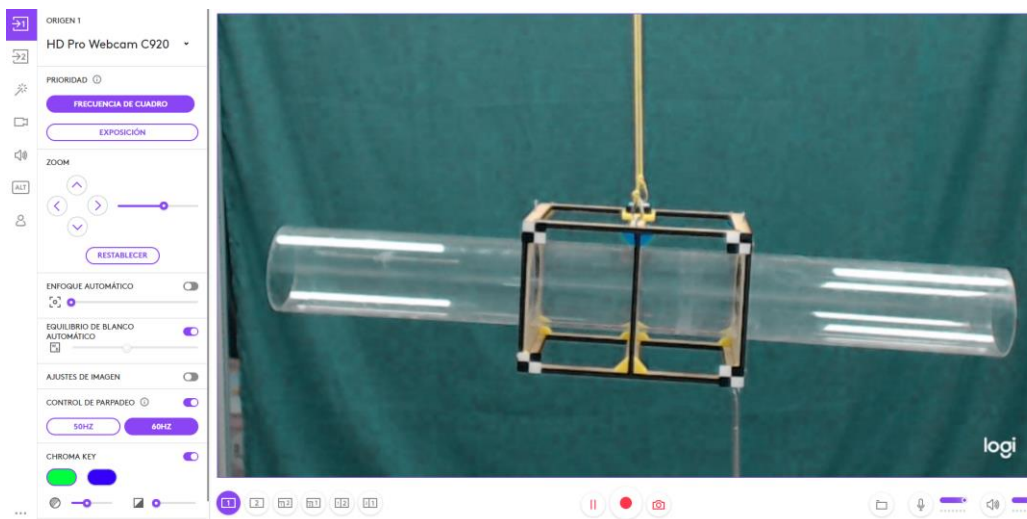


Figura 3-19 Interfaz Logitech Capture (autoría propia).

En este proyecto, Logitech Capture ha permitido capturar videos de las diferentes mediciones en el proceso de balanceo del péndulo, mediante la cámara *Logitech Carl Heiss Tessar 1080p*. Estos vídeos serían posteriormente importados al *Tracker* para analizar y de tal manera corroborar los datos recogidos por el acelerómetro.

3.2.6 Tracker

Se trata de un programa gratuito de análisis de video. Entre sus características más reseñables encontramos la capacidad de seguimiento manual y automático de objetos, combinada con la superposición de posición, velocidad y aceleración, seguimientos de centros de masa y la posibilidad de generar datos y análisis para crear modelos cinemáticos o dinámicos que describen los fenómenos a estudiar. Este modelo podrá posteriormente compararse con los datos experimentales para comprobar su fiabilidad.

Para este proyecto, el *Tracker* ha permitido obtener una segunda medición del comportamiento de oscilación del péndulo en los diferentes instantes de su trayectoria, corroborando los datos ofrecidos por el acelerómetro (Figura 3-20).

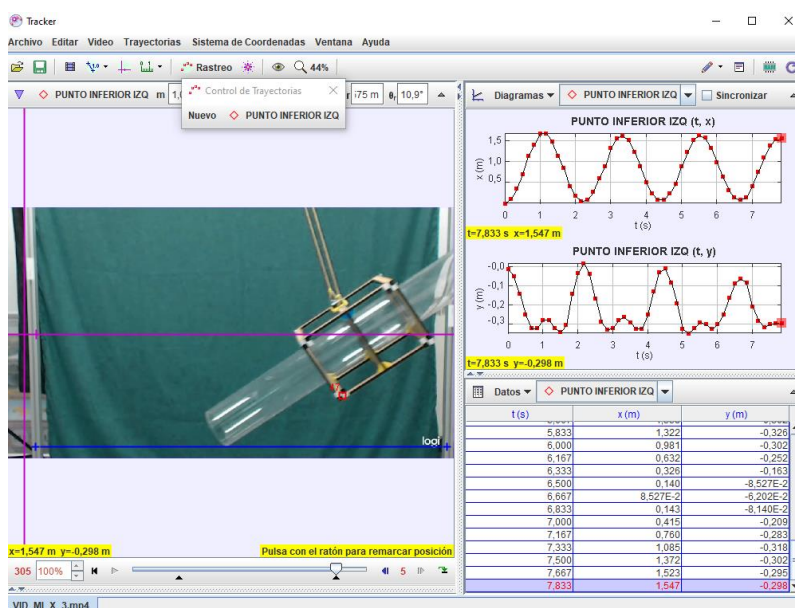


Figura 3-20 Interfaz software Tracker (autoría propia).

3.2.7 WitMotion.exe

Este software fue desarrollado por la compañía *WitMotion Shenzhen CO. Ltd.*, dedicada al desarrollo de sensores capaces de detectar y medir diferentes fenómenos como las vibraciones, inclinaciones, aceleraciones angulares, gradientes de temperatura, etc. Tiene como principal objeto representar, de manera visual e intuitiva para el usuario, todos los datos recabados, por los sensores a los que esté vinculado, en forma de gráficas para periodos de tiempo determinados (Figura 3-21).



Figura 3-21 Interfaz software WitMotion (autoría propia).

En el caso de este proyecto, como se mencionó en el apartado anterior, el sensor que se empleó fue un acelerómetro de la misma marca, cuyo fin era el de medir la inclinación y comportamiento del *Glider* durante los diferentes ensayos. De tal manera, con los datos devueltos por este programa, posteriormente se realizarían los cálculos oportunos para calcular el centro de gravedad y momentos de inercia del *Glider* en los tres ejes de coordenadas.

Como se puede apreciar en la Figura 3-21, aparentemente el acelerómetro solo devuelve datos referentes a los ángulos de inclinación durante su intervalo de medición. Sin embargo, al final la medición, el propio programa devuelve automáticamente una hoja de cálculo con todos los parámetros que el sensor es capaz de medir durante el tiempo de estudio, entre los cuales se encuentran otros parámetros como las velocidades angulares y aceleraciones en los tres ejes principales, etc. (Figura 3-22).

Time(s)	ax(g)	ay(g)	az(g)	wx(deg/s)	wy(deg/s)	wz(deg/s)	AngleX(deg)	AngleY(deg)	AngleZ(deg)	T(°C)	hx	hy	hz	q0
19:03:54.936	-0,0005	0,1016	0,9922	-0,0610	0,0000	0,1831	6,1523	-0,0989	21,7639	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:54.984	0,0000	0,1006	0,9927	-0,3052	0,0000	0,0000	6,1194	-0,0934	21,7749	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:55.152	0,0000	0,0996	0,9937	-0,4272	0,0000	-0,0610	6,0645	-0,0879	21,7694	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:55.194	0,0020	0,0991	0,9932	-0,3662	0,0000	-0,0610	6,0040	-0,0824	21,7584	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:55.317	0,0034	0,0981	0,9932	-0,2441	0,0000	0,0000	5,9546	-0,0824	21,7529	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:55.404	0,0039	0,0986	0,9932	0,0000	0,0000	0,0000	5,9271	-0,0879	21,7529	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:55.536	0,0029	0,0986	0,9941	0,0610	0,0000	0,4272	5,9161	-0,0989	21,7804	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:55.614	0,0010	0,0986	0,9927	0,2441	0,0000	0,4272	5,9106	-0,1044	21,8298	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:55.755	0,0000	0,0991	0,9937	0,2441	0,0610	0,4272	5,9216	-0,1099	21,8793	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:55.794	-0,0005	0,0996	0,9932	0,1831	0,0000	0,3052	5,9326	-0,1099	21,9122	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:55.914	-0,0005	0,0996	0,9922	0,0610	0,0000	0,1831	5,9381	-0,0989	21,9342	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:56.004	0,0005	0,0996	0,9927	0,0610	0,0000	0,0610	5,9271	-0,0934	21,9452	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:56.136	0,0020	0,0996	0,9922	0,0610	0,0000	0,0610	5,9216	-0,0879	21,9452	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:56.215	0,0024	0,0996	0,9927	0,1831	0,0000	0,2441	5,9216	-0,0879	21,9617	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:56.370	0,0024	0,0986	0,9922	0,3662	0,0610	0,4272	5,9381	-0,0934	21,9946	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:56.395	0,0010	0,0986	0,9937	0,4883	0,0000	0,6104	5,9711	-0,0989	22,0441	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:56.545	0,0000	0,0991	0,9932	0,6104	0,0610	0,6104	6,0095	-0,1044	22,1045	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:56.695	0,0000	0,0991	0,9922	0,6714	0,0000	0,4272	6,0535	-0,1044	22,1539	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:56.743	0,0000	0,1006	0,9927	0,5493	0,0000	0,2441	6,0974	-0,1044	22,1924	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:56.814	0,0010	0,1006	0,9927	0,4272	0,0000	0,0000	6,1249	-0,0989	22,1979	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:56.969	0,0020	0,1016	0,9927	0,3052	0,0000	0,0000	6,1359	-0,0934	22,1979	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:57.024	0,0029	0,1016	0,9917	0,1831	0,0000	0,0610	6,1414	-0,0934	22,2034	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:57.144	0,0019	0,1021	0,9927	0,0610	0,0000	0,2441	6,1359	-0,0989	22,2198	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:57.204	0,0024	0,1021	0,9917	0,0000	0,0610	0,3662	6,1194	-0,1099	22,2528	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:57.350	0,0015	0,1006	0,9932	-0,1831	0,0000	0,4272	6,0974	-0,1154	22,2913	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:57.414	0,0000	0,1001	0,9927	-0,2441	0,0000	0,2441	6,0590	-0,1154	22,3242	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:57.570	-0,0010	0,0991	0,9927	-0,3662	0,0000	0,0610	6,0095	-0,1154	22,3407	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:57.624	-0,0010	0,0986	0,9927	-0,4272	0,0000	-0,1221	5,9546	-0,1044	22,3407	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:57.744	0,0000	0,0977	0,9932	-0,3052	0,0000	-0,1831	5,9052	-0,0989	22,3242	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:57.804	0,0015	0,0977	0,9932	-0,1221	0,0000	-0,1831	5,8667	-0,0934	22,3022	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:57.954	0,0015	0,0981	0,9932	0,1221	0,0000	0,0000	5,8557	-0,0934	22,2913	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:58.014	0,0020	0,0977	0,9927	0,3052	0,0000	0,0000	5,8667	-0,0934	22,2913	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19:03:58.134	0,0005	0,0986	0,9927	0,4883	0,0000	0,0000	5,8942	-0,0934	22,2913	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Figura 3-22 Datos medidos por el acelerómetro (autoría propia).

3.2.8 Matlab/Octave

MATLAB y *Octave* son sistemas de cómputo numérico que ofrecen un entorno de desarrollo integrado a través de un lenguaje de programación propio. Se trata de unas plataformas de programación y cálculo numérico utilizadas para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos matemáticos.

Entre sus prestaciones principales se encuentran la manipulación de matrices, implementación de algoritmos, así como la representación de datos y funciones tanto en 2 como en 3 dimensiones.

Es esta última faceta es la que más se ha aprovechado en este proyecto, en concreto para importar todos los datos recopilados por el acelerómetro y, aislando los datos que queremos analizar, representarlos en diagramas de ejes, incluso permitiendo comparar los resultados de diferentes ensayos simultáneamente (Figura 3-23).

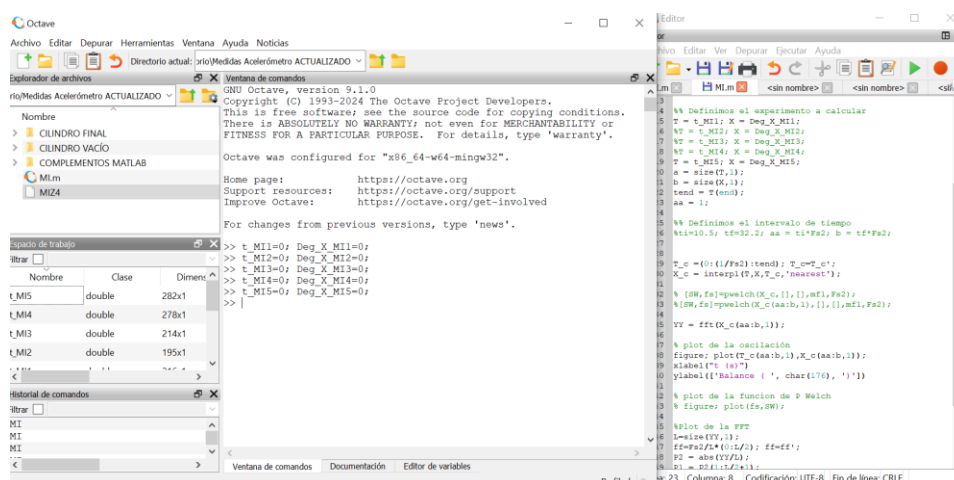


Figura 3-23 Procesado de datos con Octave (autoría propia).

3.3 Procesado de datos

Para comprender correctamente el objetivo principal de este proyecto, es necesario explicar paso a paso las fases de este. En primer lugar, fue necesario el montaje físico del banco de ensayos para el *Glider* (soporte metálico y soporte de madera, fondo cromado, además de la instalación del péndulo bifilar). Una vez realizado, habría que calibrar e instalar el sensor en un punto de interés para el proceso medición. En este caso, se escogió el centro de la cara superior del soporte de madera, ya que como el conjunto soporte-tubería sería simétrico y tendría inclinación nula en el instante inicial, este sería el punto más adecuado para medir los parámetros de interés de manera fiable.

A continuación, se obtuvieron los parámetros de nuestra “probeta” que serían de relevancia para llevar a cabo los cálculos pertinentes:

CUALIDAD	MEDIDA
Longitud (cilindro)	1,02 m
Diámetro (cilindro)	0,12 m
Elevación alcayata del péndulo sobre soporte de madera	0,05 m sobre cara superior
Elevación alcayata de soporte de pesos calibrados	0,02 bajo la cara inferior
Peso cilindro vacío	1,78 kg
Peso soporte de madera	0,53 kg

Tabla 3-2 Medidas relevantes para los ensayos.

Una vez finalizados todos estos pasos, se instaló el conjunto soporte-tubería en el péndulo bifilar, siendo el aspecto final del banco de ensayos similar a la disposición que se puede encontrar en la Figura 3-3.

A continuación, después de conectar la cámara y colocar las dianas de seguimiento en los putos de estudio, podremos proseguir con la fase de medición y cálculo. El proyecto cuenta esencialmente con el desarrollo de dos ensayos: el cálculo del centro de gravedad y los momentos de inercia del cilindro, comparando los resultados medidos de manera experimental con los que se debería obtener mediante las fórmulas empíricas. Para ello se aplicaron una serie de metodologías existentes con el fin de obtener el comportamiento del balance y cabezada del cilindro, según el movimiento de la masa del módulo de control en los tres ejes de coordenadas (x , y , z).

Primeramente, con el fin de validar la metodología del ensayo, se llevaron a cabo ambas pruebas con la tubería de metacrilato vacía (únicamente el casco exterior). Para ello fueron necesarias, entre otras, las medidas mostradas en la Tabla 3-2.

3.3.1 Obtención del centro de gravedad

Para obtener el centro de gravedad de la tubería de metacrilato vacía de manera experimental, el procedimiento a seguir será ir variando la posición de la masa del módulo de control de orientación en el interior de la tubería, comprobando como esto afecta al desplazamiento del CG, a medida que esta se desplaza por el eje longitudinal. Para poder asemejar el ensayo de validación lo máximo posible al real, se optó por simular la influencia del peso de la masa en sus distintas posiciones, colgando diferentes pesos calibrados en los extremos del soporte de madera, para comprobar la variación de los ángulos de balance y cabezada.

Los pesos empleados para estas mediciones fueron escalando desde los 100 gramos o 1N hasta 500 gramos o 5N.

3.3.1.1 Centro de gravedad en el eje X

Este ensayo se llevó a cabo mediante la configuración mostrada en la Figura 3-24. Los pesos, se colgarían de una alcañata en uno de los extremos del eje longitudinal del soporte de madera, comprobándose a continuación los ángulos de cabezada provocados.

En este caso, como se puede apreciar en la Figura 3-24, el ángulo de cabezada X es producido por los diferentes pesos md .

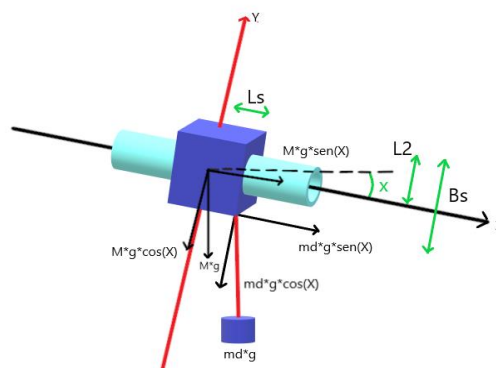


Figura 3-24 Visualización del ensayo del CGx (autoría propia).

Este ángulo (X) de inclinación es medido y recopilado por el acelerómetro, y conociendo esa guiñada y las medidas señaladas Ls , y Bs , es posible conocer el valor de $L2$, que es el correspondiente a la coordenada abscisa del centro de gravedad:

NOMBRE	MEDIDA
Ls	0,145 m
Bs	0,2 m + 0,025 m alcayatas

Tabla 3-3 Medidas para la obtención de CGx.

Prosiguiendo con la demostración matemática de la formula empírica, partimos de la situación inicial de un sumatorio de momentos de momentos:

$$\sum M = 0 \quad (1)$$

Como se puede observar en la Figura 3-24, influyen para el cálculo del centro momentos 2 fuerzas, las cuales se descomponen en 3 componentes, ya que uno de ellos se simplifica:

$$(M * g * \sin X) * L2 + (md * g * \sin X) * Bs - (md * g * \cos X) * Ls = 0 \quad (2)$$

$$(M * L2 + md * Bs) * \tan X = md * Ls \quad (3)$$

Finalmente, despejando la variable que queremos hallar, en este caso L2, obtendríamos la siguiente expresión:

$$L2 = \frac{md}{M} * \left(\frac{Ls}{\tan X} - Bs \right) \quad (4)$$

De tal manera obtenemos la posición del CG en el eje x de manera experimental para la tubería de metacrilato vacía, verificándose con la posición teórica del conjunto por su geometría. En caso de no obtener el mismo resultado, habrá que discutir a qué se puede deber el error, si es que lo hay, entre ambos resultados obtenidos.

A partir de este momento, en el que, si el margen de error obtenido entre ambos valores es asumible y justificado, quedará validado el método de análisis. A continuación, se procederá con el siguiente paso, que coincide con la obtención del centro de gravedad del prototipo real variando la posición de la masa del módulo de control.

Una vez instalado el prototipo final en el soporte de madera, se puede apreciar en la Figura 3-25 como el módulo de control podrá adoptar un total de 5 posiciones. De por sí, el bloque posee un rail con un recorrido longitudinal máximo de 0,345 m, donde la masa, impulsada por un motor eléctrico a través de un tornillo sin-fin, podrá ocupar un puesto en cada cuarto de avance. A medida que el bloque vaya recorriendo las diferentes posiciones establecidas en el rail, el centro de gravedad del prototipo se comenzará a desplazar con él, produciendo al igual que con los pesos en el ejemplo de validación, una variación del ángulo de cabezada en el *Glider*. Además, gracias a la instalación de un motor eléctrico programado para provocar un movimiento de rotación en la masa, esta también será capaz de influir en la cabezada del *Glider* en cierto modo. Esta cualidad de rotación afectaría en mucha mayor medida al estudio del centro de gravedad en el eje de ordenadas, sin embargo, debido a contratiempos en la instalación de este último motor, no se analizará la influencia del movimiento rotativo de la masa del bloque de control en este proyecto, quedando pendiente para ser analizado en futuras ocasiones.

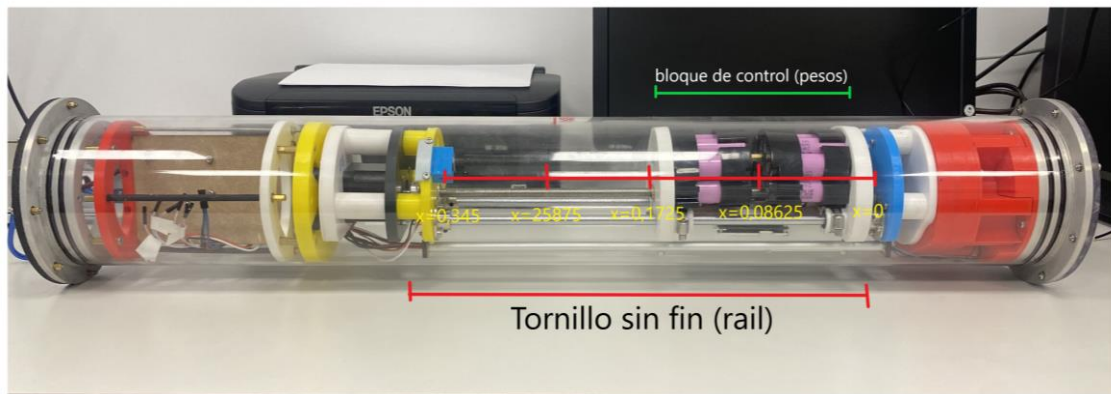


Figura 3-25 Descripción del módulo de control (autoría propia).

El prototipo final posee las siguientes medidas:

CUALIDAD	MEDIDA
Longitud (cilindro)	0,845 m
Diámetro (cilindro)	0,12 m
Elevación alcayata del péndulo sobre soporte de madera	0,05 m sobre cara superior
Elevación alcayata de soporte de pesos calibrados	0,02 m bajo la cara inferior
Peso conjunto	6,67 kg

Tabla 3-4 Parámetros del prototipo definitivo.

3.3.1.2 Centro de gravedad en el eje Y

Para la obtención del centro de gravedad en el eje de ordenadas partiremos de un escenario inicial con la siguiente configuración (Figura 3-26).

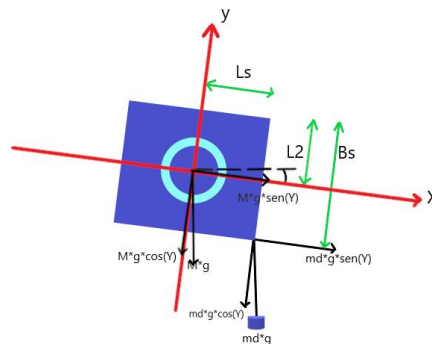


Figura 3-26 Visualización del ensayo de CGy (autoría propia).

A partir de este punto, el procedimiento de la deducción matemática y obtención y manejo de datos es idéntica al del caso anterior. No obstante, en este experimento las medidas complementarias a tener en cuenta para la obtención de los resultados son las siguientes:

NOMBRE	MEDIDA
Ls	0,09 m
Bs	0,2 m + 0,025 m alcayatas

Tabla 3-5 Medidas para la obtención de CGy.

En este caso, para la obtención de la coordenada CGy del prototipo real, el movimiento de la masa del bloque de control en el eje longitudinal supuso una variación del ángulo de balance muy inferior al apreciado en el de cabezada para CGx.

3.3.2 Obtención del momento de inercia

Para este segundo ejercicio, el procedimiento de medida cambia radicalmente, pasando del estudio estático del cilindro, al análisis de la tendencia que tendrá el cilindro a permanecer en reposo al someterle a diferentes balanceos y movimientos rotativos en los tres ejes principales (x, y, z).

Para ello, hará falta someter la metodología de análisis nuevamente a una prueba de validación, por lo que se partió de una situación inicial en la cual se estudiaba la tubería vacía (Tabla 3-2), que sería sometida a balanceos en los diferentes ejes de coordenadas.

Asimismo, se hizo nuevamente uso del acelerómetro como fuente primaria de recopilación de datos, ya que nos proporciona la posición y ángulo de inclinación del cilindro respecto al eje deseado en cada instante del balanceo. Cada medición se grabó con la cámara de alta definición, permitiendo que los videos del ensayo fuesen posteriormente analizados y procesados con el software *Tracker*, el cual nuevamente nos permitiría nuevamente obtener, como segunda fuente de dato, valores del avance e inclinación del cilindro a lo largo de sus oscilaciones rotativas.

A continuación, se estudiarán los diferentes casos y fórmulas empíricas empleadas para la obtención de los momentos de inercia:

3.3.2.1 Momento de inercia en los ejes x e y

Pasando al análisis particular de los ejes x e y, podemos decir que, al inducir un balanceo en el péndulo, se provocarán dos movimientos rotativos (*Mode 1* y *Mode 2* Figura 3-27) [37]:

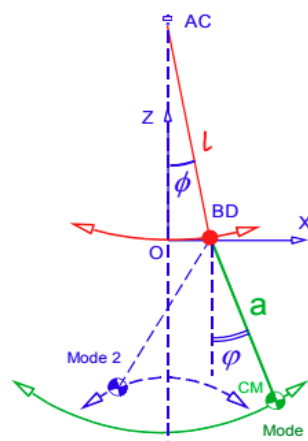


Figura 3-27 MI en los ejes X e Y [37].

Es por este motivo que habrá que tener en cuenta el parámetro del radio de giro, ya que el centro de giro se verá desplazado de su posición original debido al balanceo, cambiando conjuntamente el radio de giro (Figura 3-28):

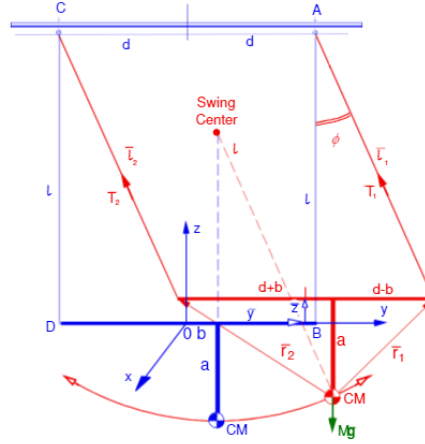


Figura 3-28 Centro de giro desplazado [37].

A este nuevo radio de giro lo denominaremos Kp , y es uno de los parámetros necesarios para obtener el valor del momento de inercia mediante las fórmulas empíricas. Tras un desglose matemático [37], podemos observar cómo Kp obtiene la siguiente expresión, dependiente de los periodos de ambos modos de oscilación (representados como $w1$ y $w2$), así como de la longitud de los hilos que conforman el péndulo bifilar (l):

$$Kp = \frac{ws^2}{l(w1w2)^2} \sqrt{\left(\frac{1 - ws^2}{w1^2}\right) \left(\frac{ws^2}{w2^2 - 1}\right)} \quad (5)$$

Asimismo, aparece el término (ws) que hace referencia al periodo del péndulo cuando es sometido a oscilaciones de ángulos pequeños ($Tsmall$), afirmándose que un péndulo bifilar se comporta igual que un péndulo simple cuando los hilos del péndulo son de masa despreciable, como es el caso, y los ángulos de oscilación son pequeños [37].

$$Ts = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (6)$$

Como se ha mencionado previamente, la longitud del hilo de la cual cuelga el péndulo juega un papel muy relevante en este experimento. Para hacer todas las medidas bajo las mismas condiciones, se optó por ajustar la longitud de los hilos a 1 m.

Para la obtención de los parámetros $w1$ y $w2$ empleamos los datos recogidos por el acelerómetro. En concreto nos interesa la variación del ángulo, respecto al eje a estudiar, en función del tiempo. Estos valores se emplearán para hacer una *Transformada de Fourier* con los datos, representando una gráfica en el dominio tiempo/frecuencia en base a la magnitud estudiada ($^\circ$), en la cual las posiciones en el eje de abscisas de los picos máximos se emplearán como $f1$ (primer máximo) y $f2$ (segundo máximo), y mediante la siguiente expresión se convertirán al parámetro w deseado (Figura 3-29) [38]:

$$w = 2\pi f \quad (7)$$

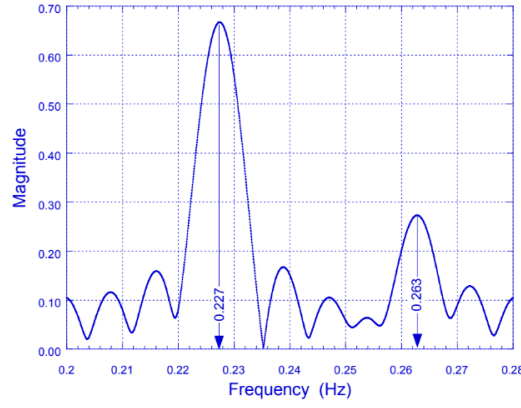


Figura 3-29 Ejemplo FFT de la trayectoria de un péndulo [38].

Una vez conocemos todos los parámetros necesarios, ya podremos obtener el valor experimental de K_p , y con él, el valor del MI del cilindro en el eje x/y:

$$I_{x,y} = l(1 - \left(\frac{T1}{T_s}\right)^2) \left(\left(\frac{T2}{T_s}\right)^2 - 1\right) \quad (8)$$

Habiendo obtenido el momento de inercia experimental, el siguiente paso, es corroborar que el valor obtenido es correcto. Para ello bastará con comparar las gráficas de movimiento del acelerómetro hechas por Matlab con las obtenidas procesando el video del experimento con el *Tracker* (Figura 3-30).

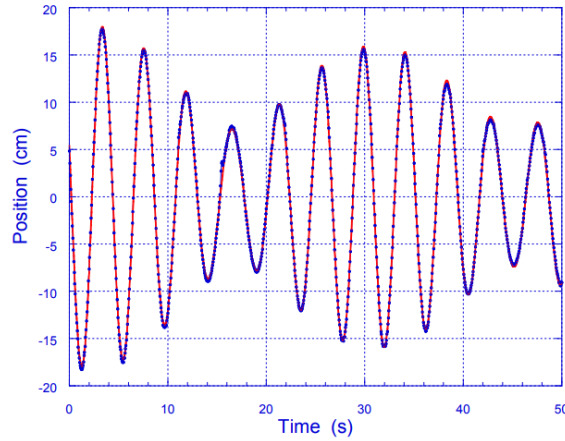


Figura 3-30 Ejemplo gráfica de movimiento de un péndulo [38].

Finalmente, para finalizar el ensayo de validación, hay que tener en cuenta el error provocado por el soporte de madera, ya que, al hacer el ensayo, hemos tenido en cuenta el momento de inercia del conjunto en su totalidad, y no del cilindro aislado. El procedimiento a seguir será el de calcular el momento de inercia teórico del cilindro vacío (ecuaciones 9 y 10) y restárselo al valor experimental obtenido. De tal manera obtendremos el valor del error (ecuación 11), que será igual a la suma del momento de inercia del soporte de madera aislado más el error de precisión en las medidas tomadas.

$$I_{tx} = \frac{1}{2}m(R1^2 + R2^2) \quad (9)$$

$$I_{ty,z} = \frac{1}{4}m(R1^2 + R2^2) + \frac{1}{12}mL^2 \quad (10)$$

$$\xi_{tot} = Isoporte + \xi_{precisión} \quad (11)$$

Nota: Los parámetros $R1$, $R2$ corresponden respectivamente a los radios interior y exterior del cilindro, mientras que L corresponde a la longitud del cilindro.

Habiendo concluido el ensayo de validación, solo restaría repetir este procedimiento con el *Glider* real en ambos ejes para cada posición del bloque de control (Tabla 3-4). Habrá que tener en cuenta, que, ya que los ensayos se medirán también con el soporte, los resultados obtenidos tendrán un error que se deberá aplicar a posteriori que será igual al calculado en el ensayo de validación (ecuación 11).

3.3.2.2 Momento de inercia en el eje z

A diferencia de los movimientos oscilatorios en los ejes x e y , en el estudio del momento de inercia en este eje pretendemos estudiar la resistencia del *Glider* a la guiñada.

En este caso, en vez de tener dos movimientos resultantes oscilatorios al balancear el cilindro. En este caso, el conjunto solamente tendrá un movimiento de giro, por lo que, a pesar de nuevamente variar el radio de giro (Ky), esta vez solamente habrá que estudiar un periodo (Ty) de oscilación en vez de dos como en el apartado anterior (Figura 3-31).

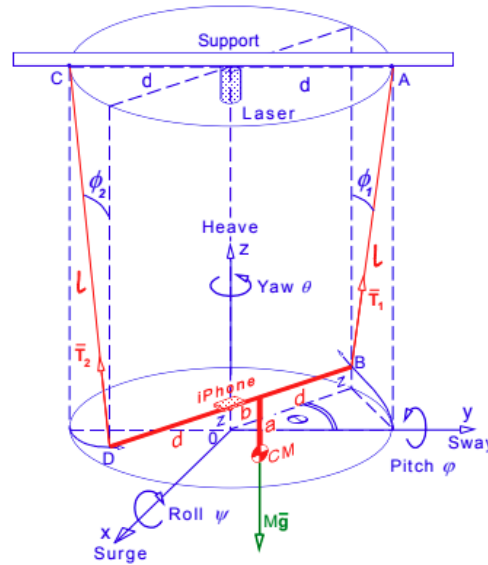


Figura 3-31 MI en el eje Z [36]

$$Ky = \frac{T_y}{2\pi} d \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (12)$$

Nota: El parámetro d hace referencia a la separación entre los hilos del péndulo.

Una vez obtenidos los valores de ambos parámetros, ya se podrá obtener nuevamente el valor experimental del momento de inercia en el eje z , mediante la siguiente expresión, que deberá ser corregida con el error calculado anteriormente:

$$I_z = \frac{T_y}{2\pi} d \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (13)$$

3.4 Diagrama de flujo

Con el fin de aclarar y facilitar al lector la comprensión de todo el procesado de datos e integrarlo en una visión general del transcurso del proyecto, se ha elaborado un breve diagrama de flujo de la línea temporal de las diferentes fases que componen el proyecto (Figura 3-32).

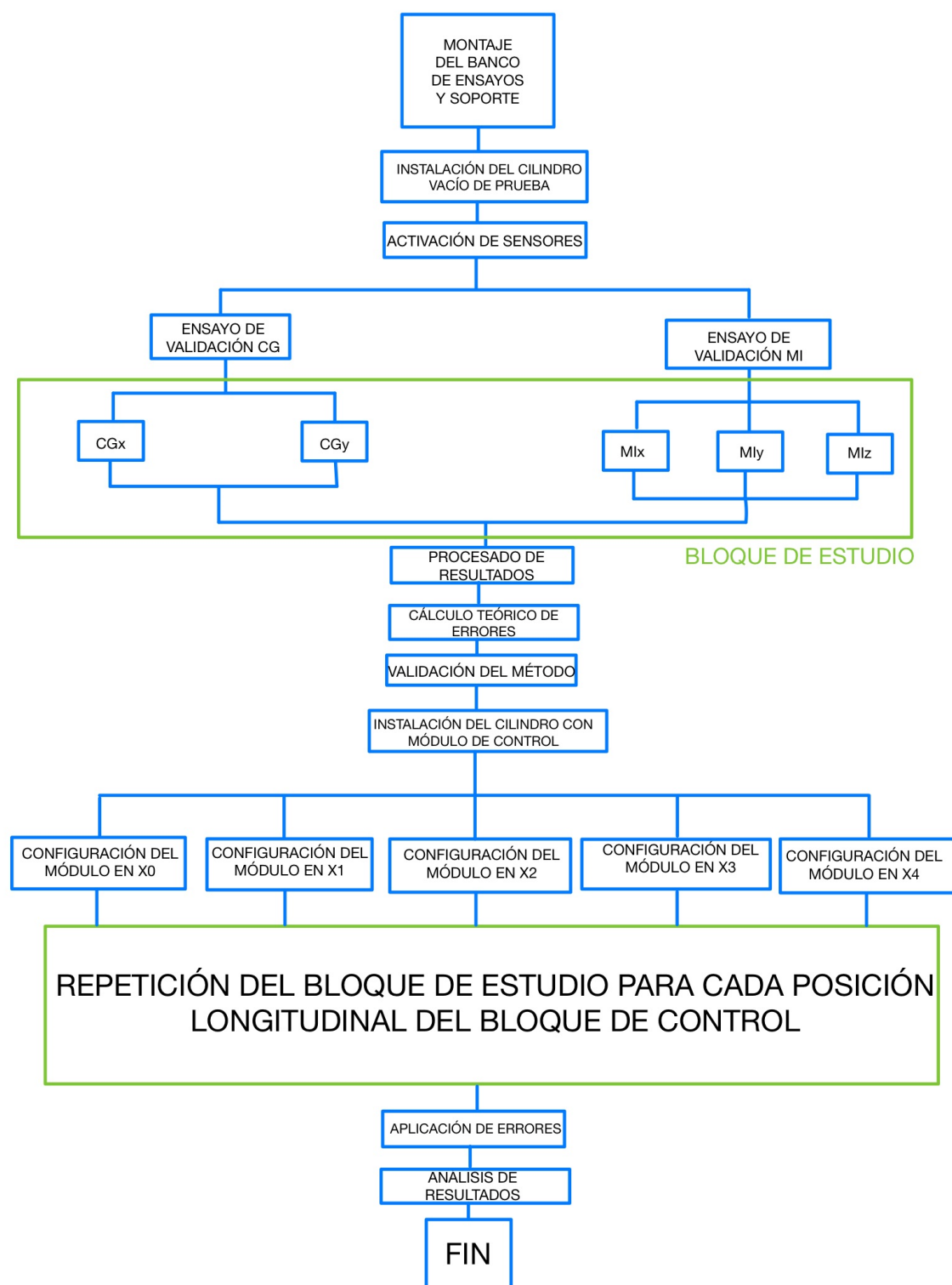


Figura 3-32 Flujo del trabajo (autoría propia).

4 RESULTADOS

4.1 Obtención del centro de gravedad

4.1.1 Centro de gravedad en x

4.1.1.1 Prueba de validación

En esta prueba se estudió la inclinación que producían en el conjunto cilindro-soporte diferentes pesos, tal que aplicando el procedimiento mostrado en las ecuaciones 1 a 4, podremos obtener el valor transversal del CG para cada caso. Posteriormente en el experimento real se demostró con ayuda de AutoCAD la posición longitudinal del CG.

PESOS (g)	ESCORA MEDIA (°)	CGx (m)
100	3,177	-0,108
200	5,796	-0,109
300	8,011	-0,109
400	9,909	-0,109
500	11,441	-0,111

Tabla 4-1 Prueba de validación CGx.

Hay que destacar que, por la simetría del montaje, el centro de gravedad teórico del conjunto debería quedar exactamente en el punto medio del conjunto soporte-cilindro, es decir, en torno a 0,105 m (en negativo) metros desde el enganche del péndulo, que en este caso se acerca bastante a la realidad, ya que el valor de la media obtenida por todos los ensayos es de $CGx = -0,1092$ m. Atendiendo nuevamente a la simetría del montaje, la componente longitudinal del CG se considerará que se encuentra a la mitad de la longitud del cilindro, en $x = 0,51$ m.

4.1.1.2 Resultado final

En el experimento real, se repitió este procedimiento para cada posición del bloque de control, con el fin de controlar como se desplaza el CG a medida que el bloque recorre el rail hacia adelante:

POSICIÓN DEL BLOQUE DE CONTROL	CGx (m)
X0	-0,099
X1	-0,100
X2	-0,103
X3	-0,104
X4	-0,108

Tabla 4-2 Experimento real CGx.

En cuanto a la posición longitudinal del CG, esta se halló gráficamente mediante Matlab, obteniéndose los siguientes resultados (respecto al centro geométrico del prototipo):

POSICIÓN DEL BLOQUE DE CONTROL	CGlongitudinal (m)
X0	-0,189
X1	-0,183
X2	-0,180
X3	-0,175
X4	-0,157

Tabla 4-3 Componente longitudinal CG.

Como se puede apreciar, a medida que el bloque va avanzando por el rail hacia la proa del cilindro, la componente longitudinal del centro de masas va avanzando con él. No obstante, se observa como en la posición más adelantada del bloque de control, aun no se ha logrado que esta componente longitudinal alcance el centro geométrico del cilindro, lo que manifiesta, como se pudo comprobar experimentalmente, un claro asiento a popa del cilindro. Para corregir este problema, se ha optado por añadir una masa ajena para hacer de contrapeso en la parte delantera del cilindro. Dicha masa se calculará en el apartado 4.3. A continuación, se mostrará un ejemplo gráfico del hallazgo de la posición longitudinal del CG (en la posición X4):

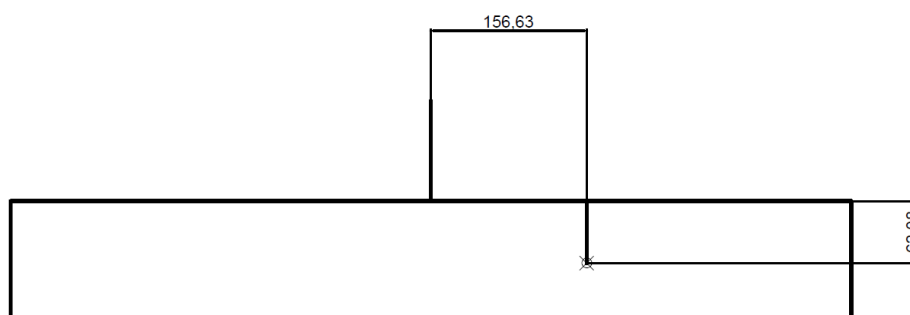


Figura 4-1 Posición longitudinal de CG en X4 (autoría propia).

Como se puede comprobar, aun con el bloque de control en su posición más avanzada, el CG queda retrasado respecto del centro geométrico del cilindro, por lo que habrá que añadir pesos en la parte delantera para corregir el asiento a popa del *Glider*, cosa que se estudiará más adelante en el apartado 4.3.

4.1.2 Centro de gravedad en y

4.1.2.1 Prueba de validación

Siguiendo el mismo procedimiento de validación llevado a cabo en el estudio de la componente del eje x (plano xz) del CG, pasaremos ahora a analizar los datos obtenidos para la coordenada en el eje y (plano yz), que nuevamente debería ser en torno a 0,105 m en negativo, pues debería coincidir con la coordenada que en el plano xz.

PESOS (g)	ESCORA MEDIA (°)	CGy (m)
100	1,968	-0,1086
200	3,644	-0,1078
300	5,082	-0,1070
400	6,262	-0,1079
500	7,292	-0,1084

Tabla 4-4 Prueba de validación CGy.

De tal manera, obtenemos nuevamente un resultado válido del ensayo de prueba para validar el método, siendo la media de los valores obtenidos CGy = -0,1080 m

4.1.2.2 Resultado final

En cuanto a los resultados del cálculo de la componente del plano yz del centro de gravedad, se obtuvieron los siguientes resultados al colgar los pesos del extremo del eje transversal del *Frame*:

POSICIÓN DEL BLOQUE DE CONTROL	CGy (m)
X0	-0,131
X1	-0,133
X2	-0,141
X3	-0,131
X4	-0,136

Tabla 4-5 Experimento real CGy

Se aprecia claramente como, a diferencia del ensayo de validación, donde al tratarse de un cilindro vacío los resultados eran mucho más parejos, en este caso en la práctica no se consigue llegar a un

consenso en los resultados de las coordenadas x e y del CG. Esto principalmente se puede deber a que al pesar más el cilindro real, el ángulo de balance se ve muy poco afectado al colgar masas de pequeño calibre de los extremos, provocando ángulos de balance muy reducidos (apenas superando los 3°), en los cuales la precisión es vital, ya que una variación de medio grado puede influir enormemente en el resultado.

Sin embargo, teniendo en cuenta que las baterías del bloque de control (lo que aporta el peso) durante el ensayo se encontraban por debajo del plano central del cilindro, eso explicaría el hecho de que los valores medidos se encuentren un poco más debajo de lo medido en el cilindro vacío, donde no existían pesos interiores que desplazasen el centro de gravedad hacia abajo.

En cuanto a la posición lateral del CG, en este se presupondrá que, debido a la simetría lateral de la composición del cilindro, el CG no se deberá ver desplazado lateralmente en ninguno de los casos, y por tanto no se adjuntará una demostración gráfica.

4.2 Obtención del momento de inercia

4.2.1 Prueba de validación

Pasando a estudiar el experimento del momento de inercia, comenzaremos con los resultados de la prueba de validación del momento de inercia en los tres ejes:

MI CILINDRO HUECO	RESULTADO
Eje x	0,020 kgm^2
Eje y	0,185 kgm^2
Eje z	0,181 kgm^2

Tabla 4-6 Prueba de validación MI.

4.2.2 Cálculo teórico de errores

Para comenzar con este apartado, se llevó a cabo el cálculo teórico del momento de inercia en los tres ejes del cilindro hueco (ecuaciones 9, 10) (con los datos de la Tabla 3-2). para de ahí restar los resultados obtenidos a los experimentales.

MI TEÓRICO CILINDRO HUECO	RESULTADO
Eje x	0,0064 kgm^2
Eje y	0,162 kgm^2
Eje z	0,162 kgm^2

Tabla 4-7 MI teórico del cilindro vacío.

De tal manera, con los resultados experimentales obtenidos en el proceso de validación, si les restamos estos valores, obtendremos el valor de la influencia del soporte de madera sumado al error de precisión en la toma de medidas (ecuación 13), el cual utilizaremos para restárselo a todos los

resultados experimentales obtenidos con el fin de obtener el valor real del momento de inercia en cada posición del bloque de control. Por tanto, haciendo esta resta obtenemos que:

ERROR	RESULTADO
$\xi_{\text{tot } x}$	0,0136 kgm^2
$\xi_{\text{tot } y}$	0,023 kgm^2
$\xi_{\text{tot } z}$	0,019 kgm^2

Tabla 4-8 Errores teóricos.

Estos serán los valores que habrá que restarle a todos los momentos obtenidos en las diferentes posiciones del bloque de control para obtener el momento de inercia corregido del cilindro real aislado.

4.2.3 Resultado final

4.2.3.1 Momento de inercia en x

Pasando a mostrar los resultados del experimento real, al igual que en el experimento de la obtención del centro de gravedad, era necesario estudiar el valor del momento de inercia para cada posición del módulo de control. Los valores obtenidos corregidos (restando el error):

POSICIÓN DEL BLOQUE DE CONTROL	MIx (Kgm^2)
X0	0,904
X1	0,734
X2	0,655
X3	0,601
X4	0,516

Tabla 4-9 Experimento real MIx.

Como se puede apreciar, los resultados obtenidos a priori tienen sentido, ya que a medida que más se estabiliza el *Glider*, menos resistencia opone a la rotación angular.

Como ya se explicó en el apartado de procesamiento de datos, para obtener los parámetros necesarios para calcular el momento de inercia, fue necesario realizar las *FFT* de los datos recopilados por el acelerómetro con *Matlab*. Estas fueron algunas de las gráficas obtenidas, donde se ven claros los dos picos máximos (f_1 y f_2) mencionados en el apartado anterior:

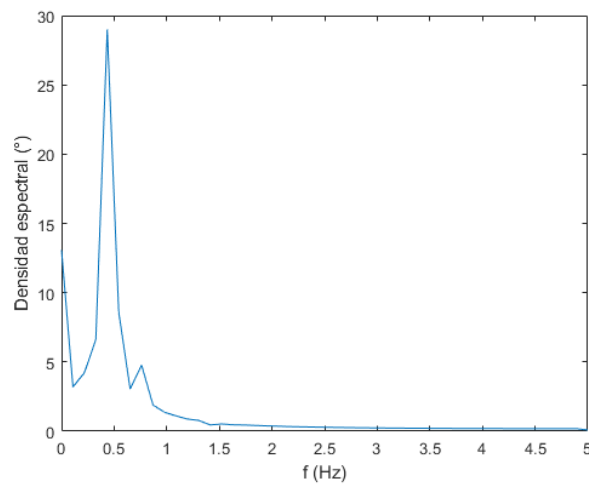


Figura 4-2 Mlx FFT (autoría propia).

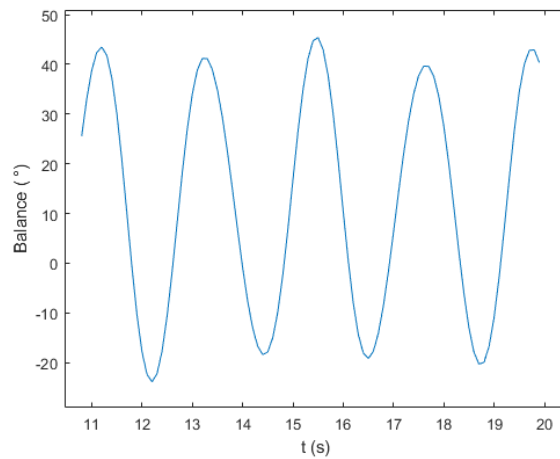


Figura 4-3 Variación angular respecto al del tiempo Mlx (autoría propia).

4.2.3.2 Momento de inercia en y

Prosiguiendo con el eje de ordenadas, estos fueron los resultados corregidos obtenidos en relación con el momento de inercia:

POSICIÓN DEL BLOQUE DE CONTROL	MIy (Kgm^2)
X0	0,990
X1	0,658
X2	0,576
X3	0,382
X4	0,338

Tabla 4-10 Experimento en MIy.

Nuevamente, al igual que en el apartado anterior, los resultados tienen a priori sentido ya que van de mayor a menor a medida que se va estabilizando el *Glider* y por tanto ofrece menos resistencia a la rotación.

Estas fueron algunas de las gráficas recopiladas en el experimento del eje y, viéndose claramente representados los valores de los picos máximos de la *FFT* (f_1 y f_2) por la coordenada x de los puntos señalados (Figura 4-4):

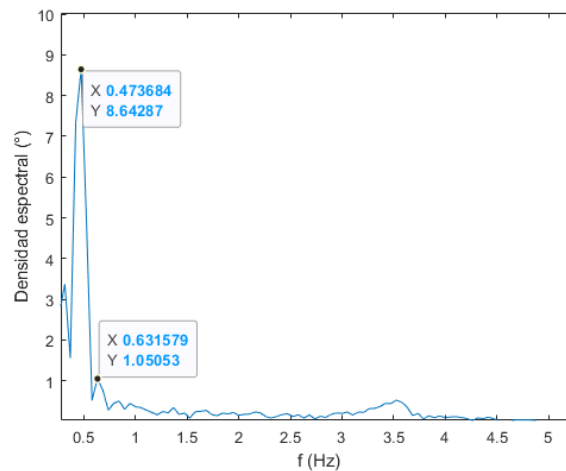


Figura 4-4 MIy FFT (autoría propia).

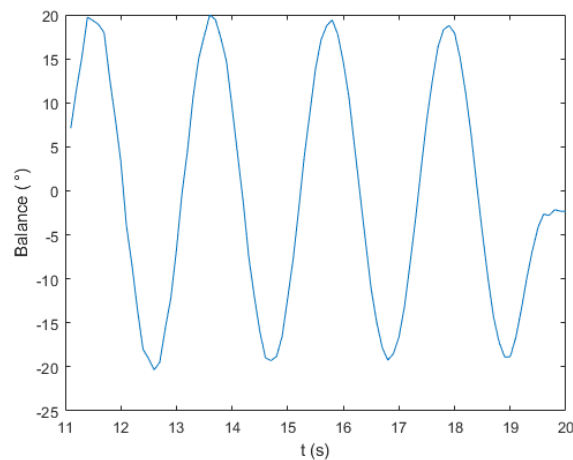


Figura 4-5 Variación angular respecto al tiempo MIy (autoría propia).

4.2.3.3 Momento de inercia en z

Por último, se llevó a cabo el experimento del momento de inercia del eje z, y estos fueron los resultados corregidos obtenidos:

POSICIÓN DEL BLOQUE DE CONTROL	MIy (Kgm^2)
X0	0,425
X1	0,391
X2	0,374

POSICIÓN DEL BLOQUE DE CONTROL	MI _y (Kg·m ²)
X3	0,345
X4	0,305

Tabla 4-11 Experimento en MI_z.

En el caso del eje z también volvemos a observar como a medida que el bloque de control avanza por el rail y provoca un desplazamiento del centro de gravedad hacia adelante, el cuerpo del cilindro se estabiliza, ofreciendo menor resistencia que cuando el bloque se encuentra en la posición más atrasada X0.

Como se comentó en el apartado de procesamiento de datos, al medir el momento de inercia en el eje z, el cilindro solamente se movería en un único plano, por lo que a diferencia de las gráficas obtenidas para los experimentos en los ejes x e y, las FFT en z solo mostrarán un valor máximo f_y :

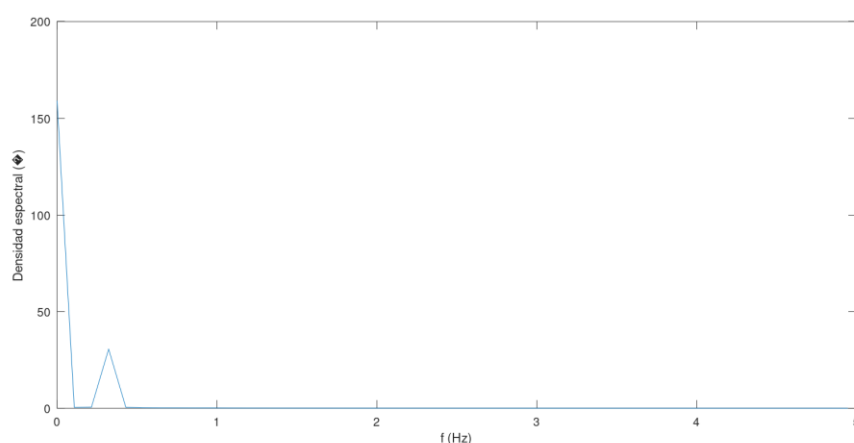


Figura 4-6 MI_z FFT (autoría propia).

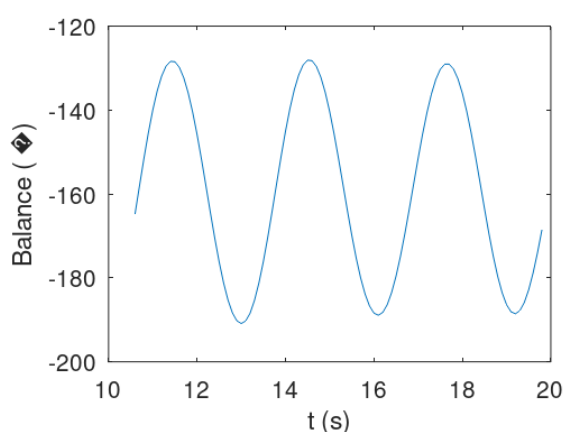


Figura 4-7 Variación angular respecto al tiempo MI_z (autoría propia).

4.3 Corrección de pesos

En los resultados obtenidos en el apartado del cálculo del centro de gravedad del *Glider*, se observa como este se encuentra desplazado hacia la cola del planeador en todas las posiciones del bloque de control. De tal manera, podemos deducir que como los pesos están desplazados hacia la parte trasera, esta tenderá a hundirse, provocando un levantamiento del bulbo delantero e impidiendo una navegación

eficiente. Ya que lo que se pretende es que el Glider pueda navegar y tanto ascender como descender con el bulbo apuntando en la dirección de avance, será necesario realizar una corrección de pesos, añadiendo peso en la mitad delantera del cilindro.

Por diferentes motivos se ha decidido que en este caso lo óptimo será lograr que el centro de gravedad del Glider, cuando el bloque de control se encuentre en la posición X2 (posición central en el rail del bloque de control), se encuentre en la posición central del cilindro, permitiendo la existencia de un punto de estabilidad controlada del planeador.

El cálculo de la masa necesaria para corregir esta tendencia de cabezada a popa se llevó a cabo en base a una estimación teórica, ya que el prototipo aún no está totalmente finalizado. Esta será la expresión empleada:

$$X_{cm} = \frac{m_5x_5 + m_6x_6 + m_7x_7 + m_8x_8}{m_5 + m_6 + m_7 + m_8} \quad (14)$$

A continuación, se definirán los parámetros empleados en la expresión 14 para obtener m_5 que es la masa que se pretende colocar en el espacio que queda libre debajo del motor eléctrico de proa (x_5). Para el cálculo se tomará como punto de referencia la proa del cilindro:

PARÁMETRO	MEDIDA
L (longitud del cilindro)	0,845 m
XCG (centro geométrico del cilindro)	0,4225 m (desde la proa)
M5	Masa al calcular
X5	0,176 m (desde la proa)
M6 (bloque de control en X2)	1,85 kg
X6 (X2 referenciado desde la proa)	0,503 m
M7 (conjunto motor eléctrico proa)	0,25 kg
X7 (CG conjunto proa)	0,0885 m
M8 (conjunto popa)	0,5 kg
X8 (CG conjunto popa)	0,775 m

Tabla 4-12 Parámetros de interés para la corrección de pesos.

Para comprender mejor estos datos, se ha elaborado un esquema de la que muestra la situación general del ejercicio (Figura 4-8):

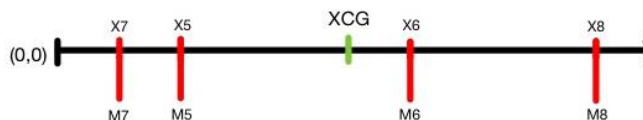


Figura 4-8 Ejercicio de corrección de pesos (autoría propia).

Sustituyendo todos los datos en la expresión y despejando el valor que queremos obtener m_5 , obtenemos que la masa a añadir para que el centro de masas del *Glider*, cuando el bloque se encuentre en X2, se encuentre en el centro geométrico del cilindro, obtenemos que la masa a añadir sería de unos 700 g en la posición X5.

4.4 Regulación de la flotabilidad neutra

Una vez hemos calculado la masa necesaria para que el cilindro flote horizontal cuando se deposite en el agua, ahora tendremos que calcular si la masa actual corregida del cilindro es suficiente o no para que posea estabilidad neutra en esas condiciones iniciales. En caso de que el peso actual no alcance el peso requerido, el *Glider* flotará, pero no logrará sumergirse, y en caso contrario, no será capaz de hacer superficie. Para obtener el valor de lo que tendría que pesar el cilindro para cumplir con las condiciones de la estabilidad neutra, calcularemos primeramente cuanto volumen de agua desplaza un cilindro de estas dimensiones. Para ello emplearemos las ecuaciones:

$$m = \rho V \quad (15)$$

$$V = \pi r^2 h \quad (16)$$

Teniendo en cuenta el siguiente esquema del cilindro (Figura 4-9), aplicando el método de suma de cilindros, obtenemos que el cilindro tendría que pesar 10,2 kg para tener flotabilidad neutra en agua salada. Por tanto, como nuestro cilindro corregido y sin soporte pesa actualmente 6,9 kg aproximadamente, habrá que añadirle de manera homogénea (equitativamente por el cilindro) 3,3 kg para que posea flotabilidad neutra en las condiciones establecidas anteriormente.

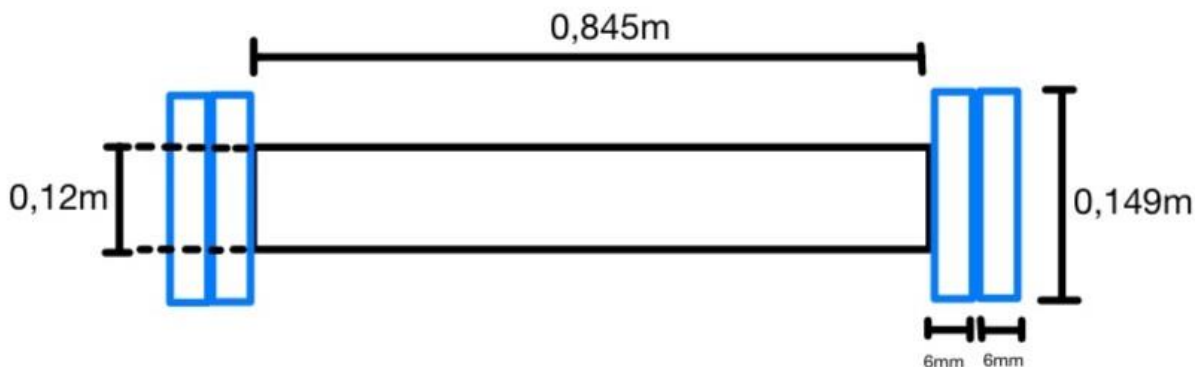


Figura 4-9 Cálculo de la flotabilidad del cilindro (autoría propia).

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este apartado se analizarán los siguientes puntos:

- Repaso del cumplimiento de los objetivos del proyecto.
- Proponer líneas futuras para futuros proyectos vinculados a este.

5.1 Conclusiones

Este proyecto se puede dividir en diversas etapas. En primer lugar, se desarrolló un estado del arte poniendo en contexto la naturaleza del proyecto y mostrando todo el avance tecnológico que este campo ha experimentado a lo largo de la historia, con el fin de introducir al lector en la temática de los planeadores submarinos.

Prosiguiendo, se planteó una metodología de estudio para la calibración del módulo de control de orientación del planeador submarino, donde tras numerosos ensayos y mediciones, con ayuda de los materiales y software pertinentes, se obtuvo la validación de una metodología matemática existente para el cálculo del centro de gravedad y momentos de inercia del AUV. En esta etapa, se concluyó que el centro de gravedad del cilindro, para cualquier posición de la masa del módulo de control, estaba desplazado hacia la popa del prototipo, provocando un asiento pronunciado a popa. A raíz de esto se concluyó que sería necesario corregir este desequilibrio añadiendo un lastre a vanguardia del centro geométrico de la tubería de metacrilato, sin exceder demasiado el peso debido a la necesidad indispensable de respetar la propiedad de flotabilidad neutra del Glider para ser capaz tanto de sumergirse como de hacer superficie. Después de realizar los cálculos pertinentes se razonó que habría que añadir una pequeña cantidad de masa de manera homogénea para cumplir dicha propiedad.

Para finalizar, se pretendió, a través de estos experimentos realizados anteriormente, obtener el modelo paramétrico completo para el módulo de control del AUV. No obstante, debido a ciertos contratiempos que mencionaré a continuación, esta tarea no pudo cumplirse del todo:

Este Trabajo de Fin de Grado está enmarcado en un proyecto de investigación a gran escala que tiene como última premisa la elaboración de un prototipo de planeador submarino completo, compuesto por varios módulos. Como proyecto de investigación, en el cual se lleva trabajando unos años, el prototipo del *Glider* ha estado durante todo el periodo del proyecto sometido a numerosas pruebas y cambios ajenos a este proyecto, véase cambios de material, tamaño, componentes electrónicos etc. con el fin de continuar avanzando en paralelo con su construcción. Uno de esos pasos, en los que se estaba trabajando paralelamente con el transcurso de este trabajo, era la propia instalación del módulo de control, así como sus componentes electrónicos necesarios para controlar su movimiento a través del cuerpo del *Glider*. Fue en este proceso, donde surgieron algunos imprevistos que impidieron tener habilitados todos los movimientos del bloque de control, ya que únicamente se logró habilitar a tiempo-

el movimiento longitudinal del bloque, pero no el rotatorio como estaba previsto. Es por ello por lo que una fracción del modelo paramétrico como tal ha quedado sin definir para este proyecto, al quedar por calibrar algunas de las posiciones del módulo de control en el cilindro. En consecuencia, se propondrá como primera idea para las líneas futuras del mismo.

Tras analizar con detenimiento todos los resultados y compararlos con los obtenidos en otros proyectos similares, se ha concluido que los resultados obtenidos son correctos y óptimos para definir el modelo paramétrico que se ideó para este trabajo.

No obstante, sí que, como posible mejora, propondría para futuras ocasiones, que cuando se plantee finalizar la fracción restante del modelo paramétrico, se invierta en un equipo de medición algo más sofisticado que el acelerómetro empleado, ya que, a pesar de su buena tasa de refresco de datos, su precisión en estudios minuciosos, con pequeños cambios en los valores a medir, puede fallar, como ocurrió en el caso del estudio del centro de gravedad del conjunto en el plano yz.

Dejando esto al margen, en general todo el material escogido para llevar a cabo este proyecto ha sido el óptimo, ya que la validez de los resultados se le atribuye en gran medida la importancia de tener un buen entorno y banco de ensayos donde realizar los experimentos con unos estándares de calidad elevados. Es importante recalcar, que aunque el planeador todavía no se encuentra en su versión definitiva, la metodología desarrollada y exitosamente empleada así como la infraestructura construida, se podrán utilizar para obtener los centros de gravedad y momentos de inercia del modelo final.

5.2 Líneas futuras

Como se planteó en el primer subapartado de este capítulo, la primera línea futura que se propone es la de lograr finalizar el modelo paramétrico del módulo de control del AUV en cuestión. Para ello se deberá seguir el mismo procedimiento explicado en este documento, estando abierto a posibles mejoras como la de adquirir un acelerómetro más sofisticado para llevar a cabo los experimentos con mayor precisión.

Asimismo, con la culminación de este trabajo, aparecen otros posibles proyectos para continuar con la línea de investigación del planeador submarino.

En primer lugar, se propone proseguir con los bloques restantes del planeador, ya sea el regulador de flotabilidad, mediante la vejiga, y hacer un estudio en profundidad del módulo de control al completo del planeador, así como la implementación de una bahía de la ciencia en la proa del planeador que permita la recopilación y análisis de datos. Asimismo, este deberá ser capaz de enviar y recibir información, por lo que también se propone hacer un estudio respecto a las antenas o sistemas de comunicaciones que se podrían integrar para permitir el intercambio de datos con estaciones en tierra.

Por último, considero que también sería de gran relevancia comenzar con el estudio del sistema primario de propulsión del planeador, las alas. Como se ha mostrado en el apartado 2.4 de este documento, ya existen bastantes tipos de drones submarinos que emplean esta tecnología, y por sus propiedades beneficiosas en cuanto al sigilo y consumos, seguramente seguirá cobrando importancia de cara al futuro. Además, también se propone considerar la integración de un sistema auxiliar de propulsión como una hélice motorizada.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Ideas para evolucionar hacia la Industria 4.0 - Sherlock Inteligencia Analítica». Accedido: 18 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sherlock-ia.com/ideas-para-evolucionar-hacia-la-industria-4-0/>
- [2] «rgmagosep20.pdf». Accedido: 18 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/archivo/rgm/2020/08-09/rgmagosep20.pdf>
- [3] SECRETARÍA DE ESTADO DE DEFENSA y Dirección General de Armamento y Material, «ESTRATEGIA DE TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN PARA LA DEFENSA ETID - 2020». Accedido: 20 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://publicaciones.defensa.gob.es/estrategia-de-tecnologia-e-innovacion-para-la-defensa-etid-2020-libros-pdf.html>
- [4] «Los cazaminas de la clase Segura - Revista Naval». Accedido: 21 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistanaval.com/noticia/cazaminas-clase-segura-series-mcm-minesniper-pluto-plus/>
- [5] «MEDCLIC: Planeadores Submarinos: Planeadores Submarinos». Accedido: 21 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.medcllic.es/es/instrumentos/glider/>
- [6] Hugo O'DONNELL y DUQUE DE ESTRADA, «EL “ICTINEO”, PRIMER SUBMARINO ESPAÑOL». [En línea]. Disponible en: <https://www.vliz.be/imisdocs/publications/ocrd/288694.pdf>
- [7] «Breve Historia del Sonar». Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.u-historia.com/uhistoria/tecnico/articulos/sonar/sonar.htm>
- [8] D. Zimmerman, «Paul Langevin and the Discovery of Active Sonar or Asdic», *The Northern Mariner / Le marin du nord*, vol. 12, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2002, doi: 10.25071/2561-5467.572.
- [9] «Figure 1: (a) Passive Sonar. (b) Active Sonar.», ResearchGate. Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/a-Passive-Sonar-b-Active-Sonar_fig46_360725719
- [10] CESEDEN, «Trilogía acerca del desarrollo naval bajo, sobre y desde la mar». Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4771338.pdf>
- [11] «SonarPropagation». Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.fonsonic.com/radar/sonarprop/>
- [12] S. Bagloee, M. Tavana, M. Asadi, y T. Oliver, «Autonomous Vehicles: Challenges, Opportunities and Future Implications for Transportation Policies», *Journal of Modern Transportation*, vol. 24, pp. 284-303, ago. 2016, doi: 10.1007/s40534-016-0117-3.
- [13] «Un ejército de drones kamikazes navales: el as en la manga de Ucrania para blindar sus buques», *El Español*. Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.elspanol.com/omicrofono/tecnologia/20221118/ejercito-drones-kamikazes-navales-ucrania-blindar-buques/718928228_0.html

- [14] «US Army could have self-driving vehicles on battlefield long before Tesla and Uber have them on road, officials say | Fox News». Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.foxnews.com/tech/us-army-could-have-self-driving-vehicles-on-battlefield-long-before-tesla-and-uber-have-them-on-road-officials-say>
- [15] Defensa.com, «El Sead 23 de Seadrone, integrado en el grupo Dédalo 23 de la Armada - Noticias Defensa España», Defensa.com. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.defensa.com/espana/usv-sead-23-seadrone-grupo-anfibio-aeronaval-dedalo-23-armada>
- [16] «¿UAV, UAS, RPAS o drones ?» Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.inta.es/INTA/es/blogs/copernicus/BlogEntry_1553849310660?valor=&valor2=/.content/bs-blog/comentarios/&valor3=/INTA/es/blogs/copernicus/BlogEntry_1553849310660
- [17] «ScanEagle», Insitu. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.insitu.com/products/scaneagle>
- [18] «operadores-del-scan-eagle-trabajan-desde-la-estacion-de-control-dentor-del-buque-galicia-foto-emad-02092015», AERONAVES MILITARES ESPAÑOLAS. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://aeronavesmilitaresespanolas.com/scan-eagle-armada-espanola/operadores-del-scan-eagle-trabajan-desde-la-estacion-de-control-dentor-del-buque-galicia-foto-emad-02092015/>
- [19] F. Supervielle, «Estudio: drones submarinos (UUV)», Fede Supervielle. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fsupervielle.com/post/estudio-drones-submarinos-uuv>
- [20] A. Sahoo, S. K. Dwivedy, y P. S. Robi, «Advancements in the field of autonomous underwater vehicle», *Ocean Engineering*, vol. 181, pp. 145-160, jun. 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.04.011.
- [21] C. Pérez-Collazo *et al.*, *Hacia un vehículo submarino modular no tripulado*. 2023. doi: 10.13140/RG.2.2.31059.76320.
- [22] «Dry Deck Shelter - Navy Ships». Accedido: 8 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://man.fas.org/dod-101/sys/ship/ddsh.htm>
- [23] R. McConoly, «What is the “Distributed Lethality” Concept? - Naval Post- Naval News and Information». Accedido: 8 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://navalpost.com/what-is-distributed-lethality-concept/>
- [24] S. Cohan, «Trends in ROV development», *Marine Technology Society Journal*, vol. 42, pp. 38-43, mar. 2008, doi: 10.4031/002533208786861335.
- [25] «Manta Ray». Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.darpa.mil/program/manta-ray>
- [26] R. Davis, C. Eriksen, y C. Jones, «Autonomous Buoyancy-Driven Underwater Gliders», G. Griffiths, Ed., CRC Press, nov. 2002, pp. 37-58. doi: 10.1201/9780203522301.ch3.
- [27] Wood, Stephen, Wood, y Stephen, «Autonomous Underwater Gliders», en *Underwater Vehicles*, IntechOpen, 2009. doi: 10.5772/6718.
- [28] S. A. Jenkins *et al.*, «Underwater Glider System Study», may 2003, Accedido: 12 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://escholarship.org/uc/item/1c28t6bb>
- [29] E. Universitat Politècnica De València, «Universitat Politècnica de València», *ing.agua*, vol. 18, n.º 1, p. ix, sep. 2014, doi: 10.4995/ia.2014.3293.
- [30] Y. Ma, Q. Huang, G. Pan, y P. Gao, «Investigation of the Hydrodynamic Characteristics of Two Manta Rays Tandem Gliding», *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, n.º 9, Art. n.º 9, sep. 2022, doi: 10.3390/jmse10091186.
- [31] E. B. Clark *et al.*, «Station-Keeping Underwater Gliders Using a Predictive Ocean Circulation Model and Applications to SWOT Calibration and Validation», *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 45, n.º 2, pp. 371-384, abr. 2020, doi: 10.1109/JOE.2018.2886092.
- [32] «Instrucciones sobre torpedos, tubos y directores de Torpedos de los Destroyers 1935.pdf». Accedido: 14 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en:

https://archivohistoricodemarina.mil.pe/Documentos/BIBLIOTECA/LIBROS%20Y%20MISCELANEOS/pdf/Instrucciones%20sobre%20torpedos%2C%20tubos%20y%20directores%20de%20Torpedos%20de%20los%20Destroyers%201935.pdf?_t=1568644210

- [33] C. V. Rohaut, «Coronel Von Rohaut: El torpedo naval más poderoso de la IIGM», Coronel Von Rohaut. Accedido: 14 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://rohaut.blogspot.com/2019/06/el-torpedo-naval-mas-poderoso-de-la-iigm.html>
- [34] 2, «Underwater Gliders for the US Navy», Militer Review. Accedido: 12 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://pena-abad.blogspot.com/2011/07/underwater-gliders-for-us-navy.html>
- [35] «Logitech C920 PRO HD Webcam, 1080p Video with Stereo Audio». Accedido: 29 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.logitech.com/en-gb/products/webcams/c920-pro-hd-webcam.html>
- [36] «[Bluetooth 5.0 Accelerometer+Inclinometer] WT901BLECL MPU9250 High-Precision 9-axis Gyroscope+Angle(XY 0.05° Accuracy)+Magnetometer with Kalman Filter, Low-Power 3-axis AHRS IMU Sensor for Arduino», WitMotion. Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://witmotion-sensor.com/products/bluetooth-5-0-accelerometer-inclinometer-wt901blecl-mpu9250-high-precision-9-axis-gyroscope-anglexy-0-05-accuracy-magnetometer-with-kalman-filter-low-power-3-axis-ahrs-imu-sensor-for-arduino>
- [37] P. Hinrichsen, «Analysis of Bi and Trifilar Oscillations», Accedido: 27 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/13047097/Analysis_of_Bi_and_Trifilar_Oscillations
- [38] P. F. Hinrichsen, «BIFILAR SUSPENSION MEASUREMENT OF BOAT INERTIA PARAMETERS», 2014.

ANEXO I: IMPLICACIONES ÉTICAS

La validación de un modelo paramétrico para la calibración del módulo de control de un AUV plantea algunas implicaciones éticas que deben ser consideradas:

- La principal preocupación ética radica en garantizar que el modelo calibrado sea preciso y fiable, ya que cualquier error en la calibración del modelo podría conllevar una mala gestión y uso del AUV, lo que podría resultar en accidentes o daños involuntarios a terceros.
- Por otro lado, habrá que tener en cuenta que el AUV tendrá aplicaciones que tienen un impacto en recursos compartidos, como es en este caso el medio marino. Su correcto uso, junto con la cooperación con las comunidades locales, podría implicar su colaboración, favoreciendo la protección de datos sensibles y la evitar posibles impactos en el entorno no deseados, como la interferencia en zonas de litoral con elevada actividad pesquera.
- Por último, atendiendo a la característica de autonomía del *Glider*, hay que destacar que la calibración del modelo puede influir en la toma de decisiones automatizada del AUV. Esto plantea cuestiones polémicas de carácter ético sobre quién sería el responsable en caso de que las decisiones tomadas por el autómata resulten en consecuencias no deseadas, como daños a terceros o lesiones.

ANEXO II: PRESUPUESTO

En este Anexo se desglosará el precio de todos los recursos empleados para la realización del proyecto, para mostrar cual ha sido el gasto total de la investigación.

El gasto final se separará en dos partes. En primer lugar, se hará referencia a los costes fijos en función de si se ha tratado de costes de equipos (*hardware*), de programas (*software*) o materiales que haya habido que emplear. Finalmente, en segundo lugar, se hará un cómputo global de todos los tipos de gastos, ya que algunos equipos/programas varían de precio según el tiempo de uso. Comenzaré analizando un poco más en profundidad los costes fijos, que se dividen en tres grupos.

Costes fijos

Hardware

Durante el transcurso del trabajo se ha hecho uso de diferentes maquinarias y equipos. Entre ellos cabe destacar la impresora 3D *Ultimaker 3*, la cortadora láser LP 1060 y el acelerómetro.

EQUIPO	PRECIO
Impresora 3D	0,12€/hora (precio del kW/h)
Cortadora láser	1-6€/minuto
Acelerómetro	50€

Tabla 0-1 Presupuesto Hardware.

Suponiendo que al igual que en este proyecto la maquinaria empleada se encontraba disponible en el laboratorio de investigación, en la tabla superior aparecen los precios de las máquinas de impresión y corte según el uso que se haga de ellas. En concreto el precio de impresión va directamente sujeto al precio de consumo de electricidad, el cual, según el modelo de impresora y el precio de la electricidad en España en marzo de 2024; asciende a la cantidad que se muestra en la tabla. Teniendo en cuenta que para el número de piezas fabricadas la impresora 3D trabajó en torno a 10 horas, el precio por uso de la impresora se sitúa en 1,2 €.

Por otro lado, en cuanto a la cortadora láser, existen otros métodos de corte que ofrecen acabados de muy buena calidad cuyo precio sería mucho menor. Sin embargo, puesto que en este proyecto se ha utilizado dicha maquinaria, atendiendo a que el precio asciende en función de tiempo de corte necesario y el material empleado no requiere demasiado tiempo para cortarse, el precio estimado actual por este servicio es de 1-6 € por minuto. Poniéndonos en el peor de los casos, teniendo en cuenta que el grabado de la plancha de MDF duró un total de 1 minuto, el coste total será de 6 €.

Además de ello hará que tener en cuenta la necesidad de emplear un ordenador y una cámara, que en este caso han sido un ordenador y cámara personales por lo que no han supuesto ningún coste adicional para el proyecto.

Software

Respecto al software empleado, casi todos los programas empleados son de descarga gratuita desde la red. Además, los programas de pago empleados, los cuales pertenecen a los desarrolladores *Autodesk* (*AutoCAD* e *Inventor*) y *Mathworks* (*Matlab*), poseen alternativas gratuitas como *Octave* o *Solidworks*, de gran calidad y perfectamente intercambiables. En su defecto se podrá acceder gratuitamente a las mencionadas mediante un certificado de alumnado/profesorado de un centro de enseñanza universitario.

SOFTWARE	PRECIO
AutoCAD	220€/mes 0€/mes
Inventor	363€/mes 0€/mes
Matlab	50€/mes 0€/mes

Tabla 0-2 Presupuesto Software.

Material

Por último, y como mayor fracción del total de gastos fijos, encontramos los materiales empleados para el montaje del banco de ensayos, soporte de madera.

MATERIAL	PRECIO
Plancha MDF 7 mm (800x600 mm)	16,00 €
Perfiles de soporte 40x40l (6x2000 mm)	219,81 €
Perfiles de soporte 40x40l (7x1920 mm)	260,90 €
Escuadras 40x40l <i>Rexroth</i> (x12)	43,41 €
Escuadras 40x80l <i>Rexroth</i> (x12)	109,48 €
Patas M12x85 mm (x4)	75,89 €
Roldanas de cuerdas (1-6 mm) (x4)	26,00 €
Grilletes Diam 6 mm (x2)	11,00 €
Cuerda trenzada de dyneema (diámetro 3 mm, 20 m)	30,00 €
Abrazaderas de acero inoxidable (x12)	13,00 €
Guardacabos acero inoxidable (x10)	8,00 €
PLA (Material de extrusión)	21,00 €/Kg

Tabla 0-3 Presupuesto materiales.

Para calcular cuánto PLA se utilizó, se llevó a cabo en el transcurso del proyecto un recuento de cuantas copias de piezas se debieron imprimir, incluyendo las fallidas, así como el peso total de las piezas, ya que en eso se traduciría peso de material PLA invertido en ellas. Debido a que en las impresiones fallidas normalmente no se alcanza a extruir todo el material que debería conformar la pieza final, se ha hecho una estimación de 0,7 kg de material consumido, que se traduce en 14,70 € de gasto.

Por otra parte, el resto de los materiales empleados que no aparecen en esta lista, podemos encontrar la lona y el resto del sistema de instalación del fondo cromado, que no se han incluido, ya que ya estaban a nuestra disposición en el laboratorio.

Coste total

De tal manera, haciendo un cómputo global de todos los gastos, obtenemos que los costes fijos, ascienden a un total de 866,40 €. Este es el precio fijo teniendo en cuenta que ya se poseían las licencias necesarias para los softwares de pago, así como ordenador propio, cámara de alta definición, y equipos como la impresora 3D o la cortadora láser. Ya que una persona que estuviese interesada en llevar a cabo este experimento probablemente tenga acceso a un laboratorio que dispondrá ya de acceso a todos estos equipos y programas, el precio total de reproducir el experimento con los equipos y materiales empleados será muy similar al mostrado en este apartado.

ANEXO III: RESULTADOS

En este anexo se mostrarán los resultados más en detalle de lo que se vio en apartados anteriores. Comenzando con el centro de gravedad, empezaré haciendo referencia al eje x:

En X0 se obtuvieron los siguientes resultados:

PESOS (g)	ESCORA MEDIA (°)	CGx (m)
0	19,335	
100	17,890	-0,090
200	16,485	-0,095
300	15,071	-0,099
400	13,805	-0,104
500	12,504	-0,109

Tabla 0-1 CGx en X0.

En X1:

PESOS (g)	ESCORA MEDIA (°)	CGx (m)
0	17,323	
100	15,957	-0,095
200	14,445	-0,094
300	13,111	-0,099
400	11,729	-0,103
500	10,651	-0,110

Tabla 0-2 CGx en X1.

En X2:

PESOS (g)	ESCORA MEDIA (°)	CGx (m)
0	14,349	
100	12,947	-0,092
200	11,631	-0,099
300	10,361	-0,104

PESOS (g)	ESCORA MEDIA (°)	CGx (m)
400	9,088	-0,108
500	7,870	-0,113

Tabla 0-3 CGx en X2.

En X3:

PESOS (g)	ESCORA MEDIA (°)	CGx (m)
0	11,349	
100	9,986	-0,094
200	8,612	-0,098
300	7,403	-0,105
400	6,187	-0,110
500	5,049	-0,115

Tabla 0-4 CGx en X3.

Finalmente, en X4:

PESOS (g)	ESCORA MEDIA (°)	CGx (m)
0	7,749	
100	6,288	-0,092
200	4,852	-0,096
300	3,729	-0,106
400	2,858	-0,119
500	1,784	-0,124

Tabla 0-5 CGx en X4.

Atendiendo ahora a los resultados obtenidos para la componente en el eje de ordenadas, estos fueron los resultados obtenidos:

Para X0:

PESOS (g)	ESCORA MEDIA (°)	CGy (m)
-----------	------------------	---------

0	0,450	
100	-0,301	-0,107
200	-0,891	-0,122
300	-1,433	-0,133
400	-1,932	-0,143
500	-2,458	-0,1500

Tabla 0-6 CGy en X0.

Para X1:

PESOS (g)	ESCORA MEDIA (°)	CGy (m)
0	0,604	
100	-0,065	-0,119
200	-0,720	-0,124
300	-1,332	-0,130
400	-1,785	-0,143
500	-2-294	-0,151

Tabla 0-7 CGy en X1.

En X2:

PESOS (g)	ESCORA MEDIA (°)	CGy (m)
0	0,393	
100	-1,003	-0,130
200	-1,636	-0,131
300	-2,182	-0,140
400	-2,690	-0,148
500	-3,186	-0,155

Tabla 0-8 CGy en X2.

En X3:

PESOS (g)	ESCORA MEDIA (°)	CGy (m)
0	0,558	
100	-0,153	-0,112
200	-0,811	-0,120
300	-1,502	-0,123
400	-1,763	-0,147
500	-2,279	-0,153,

Tabla 0-9 CGy en X3.

Finalmente, en X4:

PESOS (g)	ESCORA MEDIA (°)	CGy (m)
0	0,704	
100	-0,058	-0,105
200	-0,503	-0,135
300	-1,131	-0,137
400	-1,617	-0,147
500	-2,073	-0,156

Tabla 0-10 CGy en X4.

A continuación, se analizarán los resultados del MI corregido, comenzando por el eje x:

En X0:

X0	MIx (Kgm^2)
Medida 1	0,829
Medida 2	0,792
Medida 3	1,013
Medida 4	0,932
Medida 5	0,932

Tabla 0-11 MIx en X0.

En X1:

X0	MIx (Kgm^2)
Medida 1	0,755
Medida 2	0,829
Medida 3	0,732
Medida 4	0,652
Medida 5	0,652

Tabla 0-12 MIx en X1.

En X2:

X0	MIx (Kgm^2)
Medida 1	0,6614
Medida 2	0,6614
Medida 3	0,6614
Medida 4	0,6614
Medida 5	0,627

Tabla 0-13 MIx en X2.

En X3:

X0	MIx (Kgm^2)
Medida 1	0,535
Medida 2	0,554
Medida 3	0,554
Medida 4	0,554
Medida 5	0,554

Tabla 0-14 MIx en X3.

Finalmente, en X4:

X0	MIx (Kgm^2)
Medida 1	0,516

X0	MIx (Kgm^2)
Medida 2	0,516
Medida 3	0,516
Medida 4	0,516
Medida 5	0,516

Tabla 0-15 MIx en X4.

Pasando a analizar los momentos en el eje Y, comenzamos con la posición X0:

X0	MIy (Kgm^2)
Medida 1	0,806
Medida 2	1,137
Medida 3	1,137
Medida 4	1,137
Medida 5	0,723

Tabla 0-16 MIy en X0.

En X1:

X0	MIy (Kgm^2)
Medida 1	0,663
Medida 2	0,663
Medida 3	0,651
Medida 4	0,651
Medida 5	0,663

Tabla 0-17 MIy en X1.

En X2:

X0	MIy (Kgm^2)
Medida 1	0,575
Medida 2	0,575
Medida 3	0,575

X0	MIy (Kgm^2)
Medida 4	0,578
Medida 5	0,575

Tabla 0-18 MIy en X2.

En X3:

X0	MIy (Kgm^2)
Medida 1	0,382
Medida 2	0,382
Medida 3	0,382
Medida 4	0,382
Medida 5	0,382

Tabla 0-19 MIy en X3.

En X4:

X0	MIy (Kgm^2)
Medida 1	0,164
Medida 2	0,564
Medida 3	0,204
Medida 4	0,110
Medida 5	0,648

Tabla 0-20 MIy en X4.

Por último, se mostrarán los resultados obtenidos para el momento de inercia en el eje z. Comenzaremos con la posición X0:

X0	MIz (Kgm^2)
Medida 1	0,401
Medida 2	0,431
Medida 3	0,379
Medida 4	0,393

X0	MIz (Kgm^2)
Medida 5	0,423

Tabla 0-21 MIz en X0.

En X1:

X0	MIz (Kgm^2)
Medida 1	0,400
Medida 2	0,390
Medida 3	0,378
Medida 4	0,394
Medida 5	0,390

Tabla 0-22 MIz en X1.

En X2:

X0	MIz (Kgm^2)
Medida 1	0,359
Medida 2	0,399
Medida 3	0,375
Medida 4	0,357
Medida 5	0,377

Tabla 0-23 MIz en X2.

En X3:

X0	MIz (Kgm^2)
Medida 1	0,351
Medida 2	0,343
Medida 3	0,343
Medida 4	0,343
Medida 5	0,343

Tabla 0-24 MIz en X3.

Finalmente, en X4:

X0	MIz (Kgm^2)
Medida 1	0,309
Medida 2	0,302
Medida 3	0,309
Medida 4	0,294
Medida 5	0,309

Tabla 0-25 MIz en X4.

ANEXO IV: TABLA DE SÍMBOLOS

En este apartado se mostrará un breve glosario de las diferentes siglas empleadas en el documento para hacer referencia a los parámetros utilizados.

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
B_s	Distancia lateral entre el centro geométrico del conjunto y masa puntual
FFT	Transformada de Fourier
f_1	Primer máximo de la gráfica de la FFT
f_2	Segundo máximo de la gráfica de la FFT
K_p/K_y	Radio de giro del péndulo
L_s	Distancia vertical entre masa puntual y enganche del péndulo
L_2	Distancia al CGx/CGy
R_1	Radio interior del cilindro (0,0575 m)
R_2	Radio exterior del cilindro (0,06 m)
X_0	Posición más atrasada del bloque de control
X_1	Segunda posición del bloque de control
X_2	Posición central en el rail del bloque de control
X_3	Tres cuartos del rail recorrido por el bloque de control
X_4	Posición más adelantada del bloque de control