



**Conocimiento y transferencia de
tecnología sobre vehículos aéreos y
acuáticos para el desarrollo transfronterizo
de ciencias marinas y pesqueras
(POCTEP 0622-KTTSEADRONES-5-E)**

Informe técnico

**Actividad 1. Estado del arte sobre vehículos aéreos y marinos
en ciencias marinas y pesqueras**

Informe sobre diseño y utilidades de los USV y AUV

Producto final – Acción 1.2 | 01-12-2019



Nombre del Proyecto: KTTSeaDrones - Conocimiento y transferencia de tecnología sobre vehículos aéreos y acuáticos para el desarrollo transfronterizo de ciencias marinas y pesqueras.

Código del proyecto: POCTEP 0622-KTTSEADRONES-5-E

Datos del proyecto

| | | | |
|------------------------------|-------------------|-----------------------|----|
| Localización | España y Portugal | | |
| Fecha de inicio | 01/10/2017 | | |
| Fecha de finalización | 31/12/2021 | Prórroga hasta | -- |
| Financiación total | € 1.120.864,43 | | |
| Contribución UE | € 840.648,32 | | |
| Cofinanciación UE (%) | 75% | | |

Datos del beneficiario principal (BP)

| | | | |
|-------------------------------|---|--|--|
| Beneficiario principal | Universidad de Huelva | | |
| Persona de contacto | Vicerrector de Investigación y Transferencia | | |
| Dirección | C/ Cantero Cuadrado 6, 21004 Huelva | | |
| Teléfono | +34 959 218013 | | |
| E-mail | kttseadrones@gmail.com | | |
| Página WEB (proyecto) | https://kttseadrones.wixsite.com/kttseadrones | | |

Datos del documento

| | | | |
|-----------------------|---|--|--|
| Nombre | Informe sobre diseño y utilidades de los USV y AUV | | |
| Acción | Acción 1.2. Vehículo autónomo de superficie (USV) y vehículo autónomo submarino (AUV) multipropósito para la gestión e investigación de aguas marinas y aguas continentales | | |
| Autores | Manuel Bethencourt Núñez (UCA) | | |
| Equipo técnico | Arturo Morgado (UCA) Antonio Querol (UCA) Pedro Luis Galindo (UCA) Andrés Yáñez (UCA) Miguel Bruno (UCA) Oscar Álvarez (UCA) Ignacio González (UCA) Laura Martín (UCA) Alberto José Gullón (UCA) Felipe Cerezo (UCA) | | |

| | |
|---|---|
| Jefes de fila de los equipos de trabajo del partenariado | Universidad de Huelva <i>Juan Carlos Gutiérrez Estrada</i> <i>Fernando Gómez Bravo</i> <i>Antonio Peregrín Rubio</i> Universidad de Cádiz <i>Manuel Bethencourt Núñez</i> <i>Luis Barbero González</i> Universidad del Algarve Jorge Semião Ayuntamiento de Isla Cristina <i>Marta González Cabrera</i> |
| Fecha | 01-12-2019 |
| Versión (nº) | 1.0 |

Las opiniones presentadas en este informe comprometen únicamente a los beneficiarios del proyecto y, en consecuencia, no representan en ningún caso la opinión oficial de los órganos de gestión del POCTEP.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN..... | 5 |
| ABSTRACT..... | 5 |
| 1. JUSTIFICACIÓN..... | 6 |
| 2. DEFINICIÓN DE VEHÍCULO AUTÓNOMO..... | 7 |
| 3. CLASIFICACIÓN DE LOS VEHÍCULOS AUTÓNOMO MARINOS NO TRIPULADOS. UTILIDADES, VENTAJAS Y DESVENTAJAS..... | 11 |
| 4. ELECCIÓN DE LOS VEHÍCULOS AUTÓNOMOS PARA EL SUBPROYECTO 2..... | 14 |
| 5. ELEMENTOS DE LOS USV Y LOS AUV..... | 16 |
| 5.1. EL CASCO Y LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES AUXILIARES..... | 16 |
| 5.1.1. USV..... | 16 |
| 5.1.2. AUV..... | 19 |
| 5.2. SISTEMA DE PROPULSIÓN Y POTENCIA..... | 21 |
| 5.2.1. USV..... | 21 |
| 5.2.2. AUV..... | 23 |
| 5.3. MODELO CINEMÁTICO Y DINÁMICO DE LOS USV Y LOS AUV..... | 24 |
| 6. CONTROL DE LOS USV Y LOS AUV..... | 25 |
| 7. SENSORES..... | 26 |
| 8. BIBLIOGRAFIA..... | 29 |

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. ROV..... | 11 |
| Figura 2. AUV..... | 11 |
| Figura 3. IAUV..... | 11 |
| Figura 4. MUV..... | 12 |
| Figura 5. UVS..... | 12 |
| Figura 6. RPAS..... | 12 |
| Figura 7. Clasificación de los vehículos marinos no tripulados. Elaboración propia..... | 13 |
| Figura 8. USV SEA-KIT con un AUV a bordo, preparado para ser lanzado por la popa..... | 15 |
| Figura 9. Vehículos USV y AUV y modo de trabajo del Subproyecto 2. Elaboración propia..... | 16 |
| Figura 10. Esquema de los distintos tipos de cascos..... | 17 |
| Figura 11. Esquema de casco de catamarán con posibilidades de navegar como trimarán..... | 17 |
| Figura 12. a) Esquema de casco de SWASSH o SWASH con casco triple híbrido. b) Navío Explorer de Abeking & Rasmussen con casco SWASSH..... | 18 |
| Figura 13. Propuesta de vehículo híbrido USV-AUV basado en un casco tipo SWASSH o SWASH. Elaboración propia..... | 18 |
| Figura 14. Esquema de forma Albacore ideal y Albacore modificada..... | 20 |
| Figura 15. Representación de los componentes generales de un AUV. Adaptado del Delphin 2..... | 20 |
| Figura 16. AUV planeador (sin propulsión) o <i>Glider</i> | 23 |
| Figura 17. Movimientos de traslación (azul) y rotación (naranja) de un USV. Elaboración propia..... | 25 |
| Figura 18. Estructura general de los sistemas de guía, navegación y control de un vehículo autónomo, adaptado de Liu et al., 2016 [5]..... | 27 |
| Tabla 1. Niveles de automatización..... | 10 |
| Tabla 2. Aplicaciones potenciales de los UMS (adaptada de Liu et al, 2016, [4])..... | 13 |
| Tabla 3. Comparación de rendimiento de UMS y otros vehículos (adaptada de Liu et al, 2016, [4])..... | 14 |
| Tabla 4: Comparación de capacidad de energía por peso de los distintos tipos de baterías, según Moreno et al., 2014 [34], adaptado a su vez de [31, 33]..... | 22 |
| Tabla 5. Notación según SNAME (1950) [35] del movimiento de vehículos marinos..... | 24 |

ACCIÓN 1.2. VEHÍCULO AUTÓNOMO DE SUPERFICIE (USV) Y VEHÍCULO AUTÓNOMO SUBMARINO (AUV) MULTIPROPÓSITO PARA LA GESTIÓN E INVESTIGACIÓN DE AGUAS MARINAS Y AGUAS CONTINENTALES

RESUMEN

En este informe se presentan los diseños y utilidades de un vehículo de superficie no tripulado USV (*Unmanned Surface Vehicle*) con capacidad para portar un vehículo submarino autónomo AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*). Ambos, de forma conjunta o por separado, podrán llevar a cabo de forma sencilla, económica y rápida diversas misiones encaminadas a la gestión o investigación del medio acuático, tanto en zonas costeras y mar abierto como en masas de agua continental. Para ello se desarrollará una plataforma portátil de fácil despliegue, con avanzadas capacidades de guía, navegación y control (GNC): con posicionamiento GPS RTK, controlada tanto a distancia por Wi-Fi, UHF y GPRS como por satélite, con autopiloto para misiones preprogramadas, etc. Esta plataforma tendrá capacidad para anexar un AUV que incorporará gran variedad de sistemas de monitorización intercambiables como ecosonda monohaz o multihaz, sonar de barrido lateral, CTD, ADCP, sensores de calidad ambiental, muestreadores de agua, contadores de partículas, etc. Ambos equipos podrán trabajar de forma conjunta o por separado. El uso de este tipo de equipamientos por parte de administraciones públicas, centros de investigación y empresas tecnológicas y medioambientales redundará en una gestión y monitorización más eficiente de las aguas marinas y continentales del suroeste de la Península Ibérica.

ABSTRACT

This report presents the designs and utilities of an unmanned surface vehicle USV (*Unmanned Surface Vehicle*) capable of carrying an autonomous underwater vehicle AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*). Both, jointly or separately, may carry out, in a simple, economical and agile manner, several missions aimed at the management or research of the aquatic environment, both in coastal and open sea areas as in continental water bodies. A portable platform will be developed, with easy deployment, advanced guidance, navigation and control (GNC) capabilities: with GPS RTK positioning, remotely controlled by Wi-Fi, UHF and GPRS as well as satellite, with autopilot for pre-programmed missions, etc. This platform will have the capacity to attach an AUV that will incorporate a wide variety of interchangeable monitoring systems such as single-beam or multi-beam echo sounder, side scan sonar, CTD, ADCP, environmental quality sensors, water samplers, particle counters, etc. Both systems may work together or separately. The use of these types of equipment by public administrations, research centres and technological and environmental companies will result in a more efficient management and monitoring of the marine and inland waters of the southwest of the Iberian Peninsula.

1. JUSTIFICACIÓN

El Golfo de Cádiz es un entrante del Océano Atlántico en la costa del Suroeste de la Península Ibérica, con cerca de 500 kilómetros de línea de litoral entre Cabo de San Vicente (Portugal), y Tarifa (España). Al mismo llegan importantes aportes de aguas continentales a través de sus ríos Guadiana, Piedras, Odiel, Guadalquivir y Guadalete. En esta costa se ubican poblaciones como Albufeira, Lagoa, Lagos, Loulé, Faro, Olhão, Portimão, Silves, Tavira, Vila Real de Santo António y Quarteira (Portugal), Isla Cristina, Huelva, Moguer, Punta Umbría, Sanlúcar de Barrameda, Chipiona, Rota, Puerto de Santa María, Puerto Real, San Fernando, Cádiz, Conil, Barbate y Tarifa (España), con grandes extensiones de reservas naturales con distinto grado de protección, como el Parque Natural da Ria Formosa, Reserva do Sapal de Castro Marim (Potugal), Paraje Marismas Isla Cristina, Paraje Natural del Río Piedras y Flecha de El Rompido, Paraje Natural Marismas del Odiel, Paraje Natural Enebrales de Punta Umbría, Parque Nacional y Natural de Doñana, Parque Natural de la Bahía de Cádiz, Parque Natural de la Breña y Marismas del Barbate, o el Parque Natural del Estrecho de Gibraltar.

La economía de toda esta zona está dominada por el sector terciario, principalmente vinculada a la actividad turística de costa. El sector secundario tiene un peso relativo mayor que el de otras provincias portuguesas o españolas cercanas, debido a la presencia de polos químicos, refinerías o astilleros, todos ellos situados en el litoral. Entre las actividades del sector primario destaca **la pesca**, uno de sus tradicionales y principales medios de vida, con algunas de las más importantes flotas pesqueras de España y Portugal. En su límite sur, el Golfo de Cádiz da comienzo a uno de los lugares geográficos y geoestratégicos más importantes a nivel mundial, el Estrecho de Gibraltar, que conecta dos mares que bañan las aguas de dos. Este mismo Golfo de Cádiz ha condicionado decisivamente la singularidad histórica y cultural de este territorio, y desde los primeros asentamientos humanos, las distintas huellas patrimoniales que permanecen en sus costas y en sus fondos marinos evidencian la confluencia de civilizaciones que facilitó el angosto Estrecho de Gibraltar, o las rutas comerciales hacia América que posibilitó el Océano Atlántico.

El pasado y el futuro de este territorio se vinculan ineludiblemente a su entorno marino. Buena parte de la actividad económica de sus agentes sociales responde a las oportunidades y a los límites que supone este entorno, que también condiciona las singularidades científicas, técnicas e industriales que en él se desarrollan, con un elevado grado de especialización de sus universidades (Universidad de Cádiz, Universidad de Huelva y Universidad de Algarve vinculadas a través del Campus Internacional del Mar CEI-MAR) en los estudios y la investigación marinas y un tejido empresarial con intensa vinculación al mar, a la navegación y al turismo costero.

Este escenario único, singularizado por sus valores históricos, oceanográficos, estratégicos, biológicos, paisajísticos, climáticos, económicos y sociales, está sometido

a una elevada presión por parte de todos los actores que él convive, en un difícil equilibrio entre el aprovechamiento de sus recursos naturales, la conservación de los mismos y el desarrollo de la sociedad que ocupa el territorio. En este proceso, el estudio y comprensión del medio marino para un aprovechamiento sostenible del mismo es a todas luces imprescindible.

Para lograr un correcto equilibrio de intereses, se hace necesaria la investigación en el desarrollo de equipos que permitan dar a conocer, de la forma más eficiente posible, los distintos parámetros físicos, químicos, biológicos y geológicos del entorno marino, o las huellas culturales que el hombre ha dejado en el mismo. En estos estudios, los vehículos autónomos o no tripulados, marinos o submarinos y más recientemente los aéreos, han comenzado a revolucionar la exploración del medio marino y las costas, ofreciendo generalmente mejor información, a un coste más reducido y ausentes de riesgos para los operarios.

2. DEFINICIÓN DE VEHÍCULO AUTÓNOMO

Aunque no existe una definición oficial de vehículo autónomo (**UV**, del inglés *Unmanned Vehicles*), podemos adaptar la que expresa la Subdirección General de Gestión de la Movilidad del Ministerio del Interior del Gobierno de España en su Instrucción 15/V-113 [1]. Así un vehículo autónomo marino sería todo vehículo con capacidad motriz en o sobre el medio acuático equipado con tecnología que permita su manejo o pilotaje sin precisar la forma activa de control o supervisión de un operador, tanto si dicha tecnología autónoma estuviera activada o desactivada, de forma permanente o temporal. En esta definición vamos a incluir a los vehículos aéreos no tripulados, que pueden operar sobre masas de agua extensas y que son objetivo del entregable 1.1.

Estos vehículos deben de ser capaces de operar en dos modos:

- Modo autónomo: modalidad de pilotaje consistente en el manejo del vehículo autónomo sin el control activo de un operador cuando su tecnología autónoma está activada.
- Modo convencional: modalidad de pilotaje de un vehículo autónomo en la que la tecnología autónoma está desactivada y su manejo debe efectuarse mediante el control activo de un operador.

Los niveles de automatización de un vehículo pueden variar. Como en el caso de la definición, se pueden adoptar los niveles que se presentan en la Instrucción 15/V-113 (Tabla 1).

La definición de vehículos autónomos abarca desde equipos de tamaño y peso muy reducido, a grandes buques de muchas toneladas, pero todos ellos pueden navegar sin

intervención humana y controlados por programas de inteligencia artificial, que son los que gestionan y resuelven a través de algoritmos los problemas que pueden surgir durante la navegación. La Sociedad de Clasificación Lloyd's Register publicó en 2017 el código Unmanned Marine Systems Code, que establece pautas para la construcción, diseño y mantenimiento de sistemas autónomos marinos, definiendo seis niveles de autonomía (AL, Autonomy Levels) [2].

- AL 0: Gobierno manual. El buque navega controlado por un operador que puede estar a bordo o puede controlarlo a distancia.
- AL 1: Soporte para decisiones a bordo. El buque se maneja automáticamente con diferentes parámetros y programas. La velocidad y el rumbo es medida por sensores que se encuentran a bordo. El operador inserta la ruta y la velocidad en forma de waypoints y se puede cambiar este parámetro si fuera necesario.
- AL 2: Soporte para decisiones a bordo o en tierra. Un sistema externo es capaz de introducir la ruta, pero el operador puede cambiar los parámetros de rumbo y velocidad si lo necesitara
- AL 3: Ejecución con operador humano que aprueba. La información se basa en lo que captan los sensores del buque. El operador debe aprobar las decisiones antes de que sean puestas en marcha.
- AL 4: Ejecución con operador humano que podría intervenir. Las decisiones sobre acciones operativas y de navegación son calculadas por el sistema que ejecuta lo que se haya aprobado por el operador. El operador puede estar en tierra e intervenir si es necesario.
- AL 5: Autonomía parcial. El sistema calcula y decide todo lo relativo a la navegación y la operación. Los riesgos son resueltos de acuerdo a cada situación. Los sensores captan información y el sistema interpreta la situación, calcula las acciones pertinentes, y las lleva a cabo, pero en caso de duda sobre la interpretación de la situación, el operador, que puede estar en tierra, debe actuar. El sistema no interacciona con él si tiene capacidad para resolver dicha situación.
- AL 6: Autonomía total. Todas las decisiones sobre navegación y operación son tomadas por el sistema. Este analiza las consecuencias y los riesgos y resuelve en base a los cambios de situación detectados por los sensores. El operador que está en tierra, solo interviene si el sistema no puede estar seguro de la solución.

Lloyd's también ha establecido distintos niveles de tolerancia de fallos:

- FT 5: Fallo operativo: ningún fallo único impide la navegación, el monitoreo seguro y la propulsión normal completa. Todas las funciones principales son redundantes,

dobles o triples. El diagnóstico y la gestión de fallos son autónomos. Puede tolerar fallos sin la intervención del operador.

- FT 4: Fallo tolerante: es posible manejar todos los fallos individuales sin la intervención del operador, pero se permite reduciendo la capacidad. Las funciones principales son redundantes. Todas las funciones son tolerantes a fallos individuales. El diagnóstico de fallos incorporado y la gestión de fallos aseguran un manejo autónomo de los mismos.

- FT 3: Fallo tolerante: es posible manejar todos los fallos individuales a través de la asistencia del operador. Se permite una reducción de la capacidad en caso de fallos. Las funciones principales son redundantes. Todas las funciones que son necesarias para ejecutar la redistribución son tolerantes a fallos individuales. El diagnóstico de fallos incorporado y el control remoto permiten el manejo de fallas a través de un operador a bordo o en tierra.

- FT 2: La propulsión y la dirección son redundantes. Otros subsistemas no son necesariamente redundantes, pero se pueden volver a acoplar para manejar fallos. El reacoplamiento para el manejo de fallos se realiza a bordo o remotamente desde tierra.

- FT 1: La propulsión y la dirección son redundantes. Otros subsistemas no son necesariamente redundantes. El diagnóstico de fallos asegura la información sobre las medidas necesarias para el manejar dichos de fallos. El manejo lo realizan personas a bordo o en tierra. Redundancia en funciones de propulsión y navegación, pero no en otros sistemas auxiliares.

FT 0: Los sistemas no son tolerantes a fallos. En caso de fallos, el reenganche / reemplazo debe ser realizado por personal a bordo. No hay redundancia en ningún sistema.

La Sociedad de Clasificación Bureau Veritas también publicó 2017 el código Guidelines for Autonomous Shipping, similar al anterior, con la diferencia de que se divide en cuatro niveles dependiendo de la categoría del buque [3].

- 0: buque convencional que navega controlado manualmente. El operador está a bordo.

- 1: buque inteligente con soporte para acciones y decisiones a bordo. El tripulante es el que ordena y dirige las operaciones.

- 2: buque autónomo. El tripulante delega en el sistema, pero debe aceptar las decisiones antes de que éstas se lleven a cabo.

- 3: buque autónomo: El tripulante supervisa el sistema, pero no debe aceptar las decisiones antes de que se ejecuten. No obstante, se le informa de todas las acciones y decisiones que se vayan a tomar.
- 4: buque totalmente autónomo. Evaluará la situación y llevará a cabo las acciones que considere oportunas en cada caso. El sistema solo solicitará y esperará confirmación en caso de emergencia.

| Nivel | Denominación | Definición | Tareas de pilotaje | | Navegación en los 360º | Control del entorno | Recuperación de las tareas de pilotaje en caso de contingencia | Tareas de pilotaje realizadas por el sistema |
|-------|------------------------------------|---|---|---|------------------------|---------------------|--|--|
| | | | Operador | Sistema | | | | |
| 0 | Sin automatización | El operador realiza continuamente todas las tareas asociadas al pilotaje, incluso cuando son mejoradas a través de algún aviso o la intervención de sistemas. | El operador realiza continuamente la tarea de pilotaje dinámico | N/A | Operador | Operador | Operador | N/A |
| 1 | Pilotaje asistido | El sistema ayuda al pilotaje desarrollando una tarea específica de pilotaje usando la información del entorno, mientras que el piloto realiza el resto de las tareas de pilotaje. | Supervisión de las tareas de pilotaje dinámico y el entorno. | El sistema realiza el pilotaje dinámico que no esté realizando el operador. | Sistema | Operador | Operador | Algunas |
| 2 | Pilotaje parcialmente automatizado | El sistema de ayuda al pilotaje desarrolla el pilotaje dinámico utilizando la información del entorno del vehículo, mientras que el piloto realiza el resto de las tareas de pilotaje | Supervisión de las tareas de pilotaje dinámico y el entorno. | Pilotaje dinámico en un caso de uso definido. | Sistema | Operador | Operador | Algunas |
| 3 | Pilotaje automatizado condicionado | El sistema de pilotaje automatizado desarrolla todas las tareas de pilotaje con la expectativa de que el operador responda adecuadamente a la petición de intervención por parte de este. | No es necesaria la supervisión constante del pilotaje automatizado pero siempre debe estar en una posición adecuada para reanudar el control. | Pilotaje dinámico en un caso de uso definido. Reconoce sus límites de rendimiento y pide al operador reanudar el pilotaje dinámico con margen de tiempo suficiente. | Sistema | Sistema | Operador | Algunas |
| 4 | Pilotaje altamente automatizado | El sistema de pilotaje automatizado desarrolla todas las tareas de pilotaje, incluso si el operador no responde adecuadamente a la petición de intervención por parte de este. | El operador no es requerido durante el caso de uso. | Pilotaje dinámico en todas las situaciones de un caso de uso definido. | Sistema | Sistema | Sistema | Algunas |
| 5 | Pilotaje plenamente automatizado | El sistema de pilotaje automatizado desarrolla todas las tareas de pilotaje bajo todas las circunstancias del medio. | N/A | Pilotaje dinámico en todas las situaciones encontradas durante toda la prueba. No requiere de operador. | Sistema | Sistema | Sistema | Todas |

Tabla 1. Niveles de automatización.

3. CLASIFICACIÓN DE LOS VEHÍCULOS MARINOS NO TRIPULADOS. UTILIDADES, VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Los vehículos no tripulados o autónomos (**UV**) que operan sobre o bajo la superficie del agua (marina o continental) se pueden clasificar de diversas maneras, por el tipo de misión a realizar, por su sistema de propulsión, siendo la más habitual la que los distribuye en función de su nivel de autonomía en una serie de categorías que es necesario aclarar:

- 1) Vehículos submarinos operados remotamente (**ROV**, del inglés de *Remotely Operated Vehicle*, Figura 1). Están conectados a la superficie mediante un cordón umbilical o un conjunto de cables unidos, que permite el intercambio de datos, la transmisión de órdenes y la alimentación eléctrica al vehículo. Están especialmente diseñados para operaciones de inspección y manipulación.

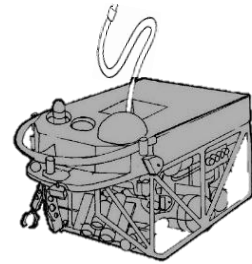


Figura 1. **ROV**.

- 2) Vehículos submarinos autónomos (**AUV**, del inglés de *Autonomous Underwater Vehicle*, Figura 2), que poseen una arquitectura de control que les permite realizar misiones sin la supervisión de un operador. Contienen además su propia fuente de energía basada generalmente en baterías recargables. Están especialmente diseñados para la observación y toma de datos ambientales. En caso particular de AUV que no disponen de impulsor de hélice, se denominan planeadores acuáticos o *Glider*, diseñados para deslizarse desde la superficie del mar hasta una profundidad programada, variando su flotabilidad y cabeceo.

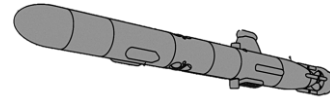


Figura 2. **AUV**.

- 3) Vehículos submarinos autónomos para intervenciones (**I-AUV**, del inglés *Intervention Autonomous Underwater Vehicle*, Figura 3): similares a los AUV pero además de realizar misiones de observación como estos, pueden realizar tareas de manipulación similares a las que realizan los ROV.

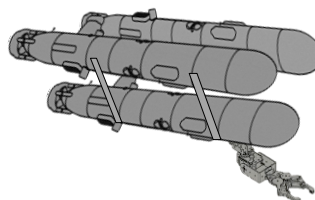


Figura 3. **I-AUV**.

Estos tres tipos de vehículos se encuentran dentro de la categoría de vehículos submarinos no tripulados (**UUV**, *Unmanned Underwater Vehicles*), cuyo nexa es la

capacidad de operar bajo la superficie del agua sin un ocupante en su interior a los mandos, en contraposición con los vehículos submarinos tripulados (**MUV**, *Manned Underwater Vehicles*, Figura 4).



Figura 4. **MUV**.

- 4) Vehículos de superficie no tripulados (conocidos por sus siglas en inglés **USV**, *Unmanned Surface Vehicle* o *ASC*, *Autonomous Surface Craft*, Figura 5). Su concepción es diferente a la de los anteriores, dado que el vehículo no opera bajo la superficie de los mares o lagos, lo que a su vez le permite una localización más precisa, una comunicación inmediata con el operador, y la transmisión de datos a tiempo real (descartada para AUV y IAUV) sin la necesidad de un umbilical que limite sus operaciones (como en el caso de los ROV). Pueden operar de forma autónoma una vez programada la misión o ser controlados de forma remota por un operador localizado en tierra, abordo de otra embarcación o vía satélite.

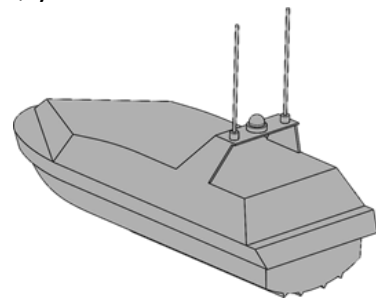


Figura 5. **USV**.

Finalmente, tanto los UUV (ROV, AUV o IAUV) como los USV pueden ser agrupados en la categoría de vehículos marítimos autónomos o no tripulados, o **UMS** (*Unmanned Maritime System*, Figura 6), para diferenciarlos de los vehículos aéreos no tripulados (**RPAS**, *Remotely Piloted Aircraft Systems* o UAVs, *Unmanned Aerial Vehicles*) comúnmente conocidos como “drones”, que también pueden realizar diferentes misiones sobre grandes masas de agua.



Figura 6. **RPAS**.

Existen otras formas de categorizar este tipo de vehículos, siendo la más común la aquí presentada y resumida en la Figura 7. Igualmente, cada una de estas categorías puede subdividirse en otras tantas, en función de la tecnología incorporada, las misiones encomendadas, el tamaño del vehículo, ect. Existen además vehículos que, valga la

redundancia, se encuentran entre dos aguas, como los híbridos ROV/AUV ya comercializados que pueden operar de forma remota o autónoma según la misión a cubrir, o más recientemente los RPAS con capacidad sumergirse (en fase experimental).

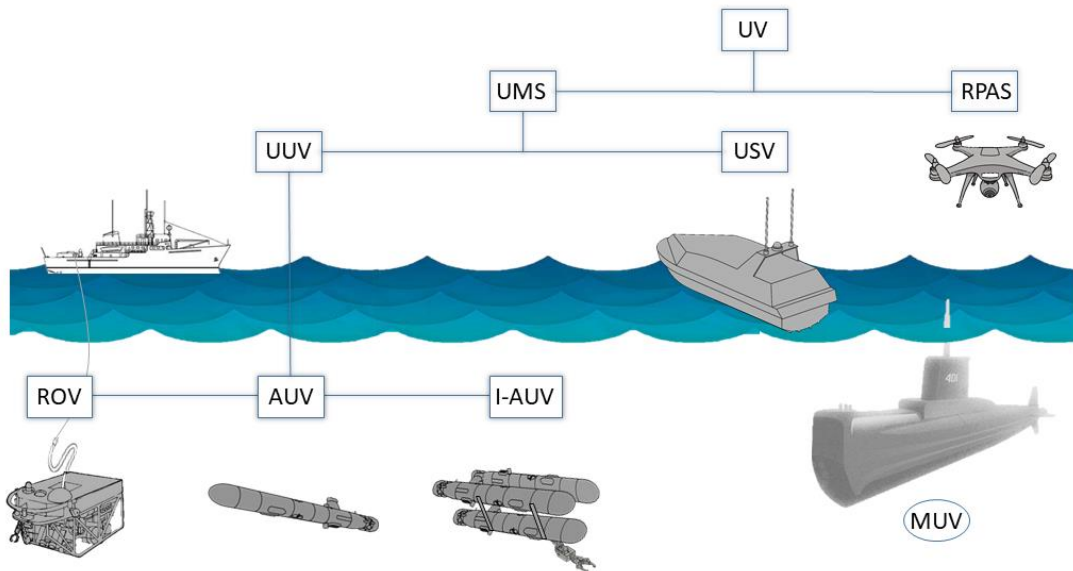


Figura 7. Clasificación de los vehículos marinos no tripulados. Elaboración propia.

La llegada al mercado de equipos de navegación más efectivos y asequibles, que incluyen sistemas de posicionamiento global (GPS) y unidades de medición inercial (IMU), así como sistemas de comunicación inalámbricos más potentes, han propiciado una serie de ventajas tecnológicas para el desarrollo de estos vehículos y de sus aplicaciones hasta hace pocos años impensables [4]. Hoy en día los UMS pueden desarrollarse para una amplia gama de aplicaciones potenciales de una manera rentable, relacionadas con la investigación científica, misiones ambientales, exploración de recursos oceánicos, usos militares y otras aplicaciones. En [5], Liu et al, 2016 enumeran solo algunas de ellas (Tabla 2).

Tabla 2. Aplicaciones potenciales de los UMS (adaptada de Liu et al, 2016, [4]).

| |
|---|
| <p>Investigación marina: Levantamientos batimétricos [6]; estudios de procesos biológicos oceánicos, migración y cambios en ecosistemas marinos [7]; investigación de actividad oceánicas; trabajo cooperativo entre vehículos aéreos, terrestres, acuáticos o subacuáticos [8, 9]; empleo como plataformas experimentales con el fin de probar diseños de cascos, equipos de comunicación, sensores, sistemas de propulsión, esquemas de control, etc. [10, 11]; prospección y levantamiento de yacimientos arqueológicos subacuáticos [12], entre otros.</p> |
| <p>Control medioambiental: Programas de monitorización, muestreos y evaluación de impacto ambiental, mediciones de contaminación y procedimientos de limpieza [13-16]; evaluación de desastres (como tsunamis, huracanes, erupciones volcánicas submarinos); ayuda a la predicción y gestión, y la respuesta de emergencia [17], entre otros.</p> |
| <p>Recursos marinos: Exploraciones de petróleo, gas y minerales [6, 18]; apoyo a plataformas offshore/instalación y mantenimiento de instalaciones, control de obra [19, 20]; evaluación</p> |

de recursos pesqueros y litorales [21-23], entre otros.

Usos de seguridad, rescate y transporte: Vigilancia, reconocimiento y patrullaje de puertos, puertos y costas [17, 20, 24, 25]; búsqueda y rescate [6, 17]; plataformas para drones [6]; transporte [26]; redes de comunicación móvil [27], entre otros.

Los UMS compiten con otros sistemas tripulados como barcos y aviones, o no tripulados como satélites y plataformas flotantes, en algunas aplicaciones específicas, Tabla 3 (adaptada de Liu et al, 2016, [4]).

Tabla 3. Comparación de rendimiento de UMS y otros vehículos (adaptada de Liu et al, 2016, [4]).

| | ⊕ Clara ventaja del UMS | ⊖ Similar | ⊗ Clara desventaja del UMS | | |
|--------------------------------|-------------------------|-----------|----------------------------|------|--------------------|
| <i>Atributos</i> | Plataformas flotantes | Satélites | Barcos tripulados | RPAS | Aviones tripulados |
| <i>Resistencia</i> | ⊗ | ⊗ | ⊖ | ⊕ | ⊕ |
| <i>Capacidad de carga</i> | ⊖ | ⊕ | ⊖ | ⊕ | ⊖ |
| <i>Coste</i> | ⊗ | ⊕ | ⊖ | ⊖ | ⊖ |
| <i>Maniobrabilidad</i> | ⊕ | ⊕ | ⊕ | ⊗ | ⊕ |
| <i>Capacidad de despliegue</i> | ⊕ | ⊕ | ⊕ | ⊗ | ⊕ |
| <i>Requisitos de autonomía</i> | ⊕ | ⊕ | ⊕ | ⊖ | ⊕ |

A estas nuevas tecnologías se unen además una serie de ventajas innatas a este tipo de vehículos: (1) Los UMS pueden llegar a realizar misiones más largas y comprometidas que los vehículos tripulados; (2) los costes de mantenimiento son más bajos y la seguridad del personal operador es mucho mayor ya que no hay tripulación a bordo; (3) el bajo peso y las dimensiones compactas de los UMS les otorgan mayor maniobrabilidad y capacidad de despliegue en zonas de difícil acceso, como aguas poco profundas o constreñidas geográficamente, áreas ribereñas y costeras, donde los vehículos más grandes no pueden operar de manera efectiva; (4) según el caso, Los USV también pueden incluir una mayor capacidad de carga potencial (aumentando su eslora y motorización) y pueden realizar estudios allí donde no llegan las aplicaciones de otros vehículos como aeronaves, RPAS o satélites.

4. ELECCIÓN DE LOS VEHÍCULOS AUTÓNOMOS PARA EL SUBPROYECTO 2

De los diferentes USV presentados, en el Subproyecto 2 de KTTSEADRONES trabajaremos con USV y AUV. Frente a los ROV (objeto del Subproyecto 3), los USV y AUV tienen la ventaja de la ausencia de umbilical, ganando libertad de movimiento pero perdiendo autonomía al estar supeditados al uso de baterías. Otra desventaja frente a los ROV es que no están preparados para tareas que demanden manipulación, pero estas no son requeridas para los tipos de misiones que se le van a encomendar a los vehículos en este subproyecto. Finalmente, los AUV no pueden geolocalizarse con la precisión de los USV ni transmitir datos mientras operan bajo el agua, pero pueden

navegar bajo la superficie en peores condiciones de mar y realizar muestreos en toda la columna de agua, desde la superficie al fondo. Las distintas características y misiones a realizar por ambos equipos los convierten en una combinación muy adecuada.

Son numerosas las empresas que comercializan unos u otros equipos, pero en el mercado no existen equipos similares al que se postula en este proyecto. Recientemente se ha desarrollado un ingenioso prototipo denominado *SEA-KIT* (Figura 8), un innovador USV preparado para cooperar con un AUV que actúa como herramienta de acceso remoto al océano profundo [28]. Las mayores ventajas del *SEA-KIT* recaen en su diseño, que le permite el transporte de un AUV comercial hasta el sitio de lanzamiento en el área de estudio, y el despliegue y la recuperación del mismo. Además, el *SEA-KIT* ofrece una solución de posicionamiento durante las operaciones del AUV.

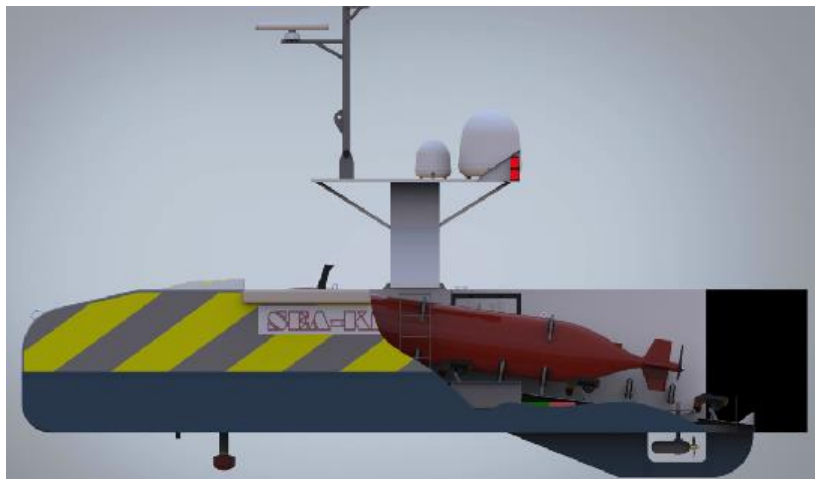


Figura 8. USV *SEA-KIT* con un AUV a bordo, preparado para ser lanzado por la popa. Dibujo de B. Simpson (<http://www.sea-kit.com/>).

No obstante, este vehículo tiene unas dimensiones y pesos considerables, con una eslora de 11 m, un peso de 7.500 Kg al que hay que sumar los 1.600 Kg del AUV, y una capacidad depósito de 2000 l de fuel, etc. que limitan mucho el tipo de misión que puede realizar y los medios para su lanzamiento y recuperación. Por otro lado, *SEA-KIT* se comporta casi exclusivamente como un medio para transportar el AUV de forma autónoma hasta la zona de trabajo, y apenas dispone de las capacidades propias de un USV. Finalmente, y no menos importante, hay que considerar lo desmesurado de su precio.

En el Subproyecto 2 de KKTSEADRONES desarrollaremos un USV con capacidad para portar un AUV. El USV podrá desarrollar dos tipos de tareas: 1) misiones propias de un

USV, empleando la sensórica disponible en el AUV que durante la navegación anulará sus sistemas de navegación y 2) vehículo con elevada autonomía para el transporte del AUV hasta la zona de trabajo (Figura 9).

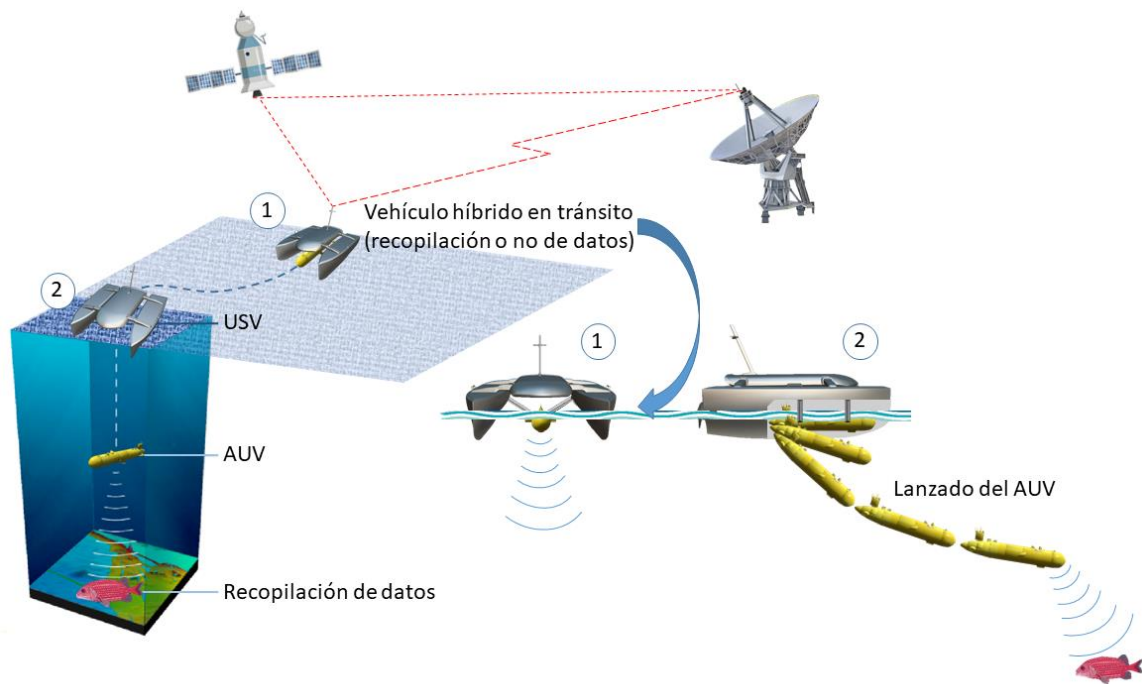


Figura 9. Vehículos USV y AUV y modo de trabajo del Subproyecto 2. Elaboración propia.

5. ELEMENTOS DE LOS USV Y LOS AUV

Dependiendo de las aplicaciones prácticas, los USV y los AUV pueden tener diferentes aspectos y funcionalidades, máxime cuando el primero opera en superficie y el segundo bajo la misma. Sin embargo, en todos ellos deben de considerarse una serie de elementos básicos o subsistemas: 1) el casco y los elementos estructurales auxiliares, 2) el sistema de propulsión y alimentación, 3) el sistema de guía, navegación y control, o GNC, 4) el sistema de comunicaciones, 5) los equipos de recopilación de datos, y 6) la estación en tierra. Todos estos subsistemas deben estar relacionados entre sí para una correcta operatividad del vehículo. A continuación se analizan uno a uno.

5.1. El casco y los elementos estructurales auxiliares.

5.1.1. USV

Por lo general existen tres tipos de cascos, cada uno de ellos con sus propias variaciones: monocascos, catamaranes o trimaranes. A su vez estos pueden ser cascos inflables con estructura rígida o cascos rígidos, Figura 10. Estas variaciones en el diseño del casco corresponden a diferentes aplicaciones de USV. Todos ellos presentan

ventajas e inconvenientes. Los cascos inflables son adecuados para aplicaciones militares principalmente debido a su mayor resistencia y capacidad de carga útil. Los diseños en monocasco y catamarán son populares debido a su conveniente montaje y carga. Los USV monocasco son fáciles de fabricar o modificar a partir de vehículos de superficie tripulados. Los USV de tipo catamarán y trimarán son más ligeros, tienen una menor superficie de fricción que les permite alcanzar mayores velocidades, presentan una mayor estabilidad del sistema en aguas tranquilas, y proporcionan una mayor capacidad de carga útil y redundancia. Sin embargo, con oleaje son menos estables que una embarcación monocasco convencional y necesitan un radio de giro mayor que esta, y por lo tanto son más lentos en esta maniobra que una embarcación convencional. Existe una opción fruto de la modificación de un catamarán, el casco tipo SWATH (*Small Waterplane Area Twin Hull*), en el que los dos cascos están formados por dos torpedos. Los SWATH son conocidos por sus buenas características de comportamiento en la mar, pero están penalizados por la resistencia al avance debido a la mayor superficie mojada que presentan respecto a los monocascos de similar desplazamiento.

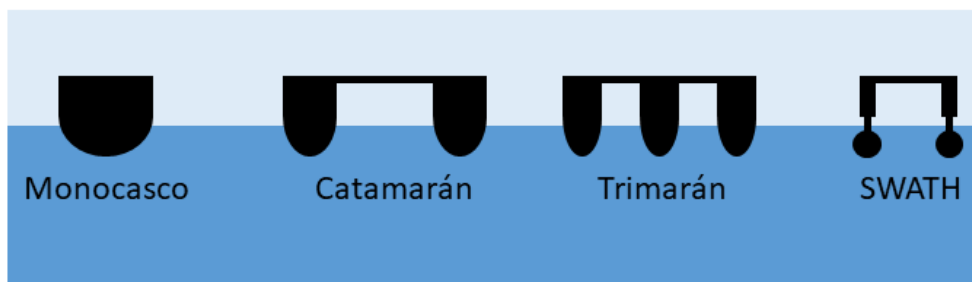


Figura 10. Esquema de los distintos tipos de cascos.

Existen infinidad de variantes de estos cascos. Así, por ejemplo, algunos catamaranes navegan normalmente con dos cascos consiguiendo una velocidad y una maniobrabilidad elevadas, pero en el caso de una excesiva mala mar, lastran tanques aumentando su calado y convirtiéndose en trimarán debido a la inmersión del casco central, consiguiendo con ello que los movimientos disminuyan al aumentar el área de la flotación, Figura 11.

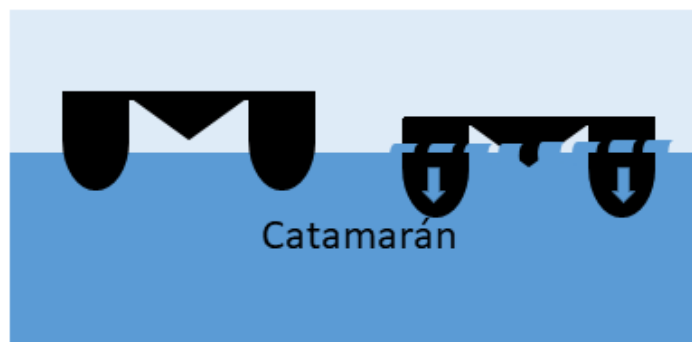


Figura 11. Esquema de casco de catamarán con posibilidades de navegar como trimarán.

Por último, existen algunos ejemplos de trimaranes tipo SWATH con un casco central sumergido que aumenta la estabilidad en el sentido de navegación longitudinal, y cascos laterales para mejorar la estabilidad transversal, Figura 12. Este casco disminuye el área mojada de los SWATH de doble casco, necesita menos potencia del motor a velocidades moderadamente altas (característica propia de los trimaranes), y disminuye la resistencia a la formación de olas. Algunos diseñadores navales lo definen como SWASSH (*Small Waterplane Area Single Stabilised Hull*) o SWASH (*Submerged Single Hull with Active Stabilization*).

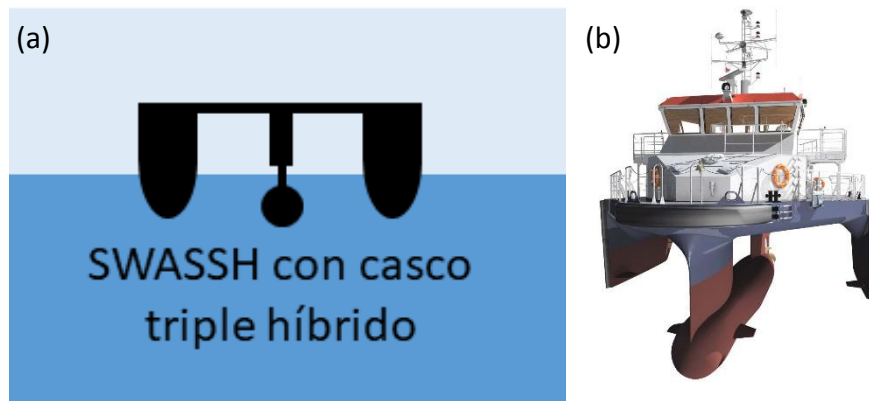


Figura 12. a) Esquema de casco de SWASSH o SWASH con casco triple híbrido. b) Navío Explorer de Abeking & Rasmussen con casco SWASSH (http://www.bluebird-electric.net/SWASH_Small_Waterplane_Area_Single_Hull.htm).

Dada la configuración elegida para nuestro vehículo, un USV con capacidad para portar un AUV, el casco tipo SWASSH o SWASH es el más adecuado para iniciar los estudios de viabilidad de transformación del casco de un catamarán deportivo de 10.5 pies propulsado a vela en un vehículo de superficie no tripulado (USV) capaz de operar autónomamente, Figura 13.

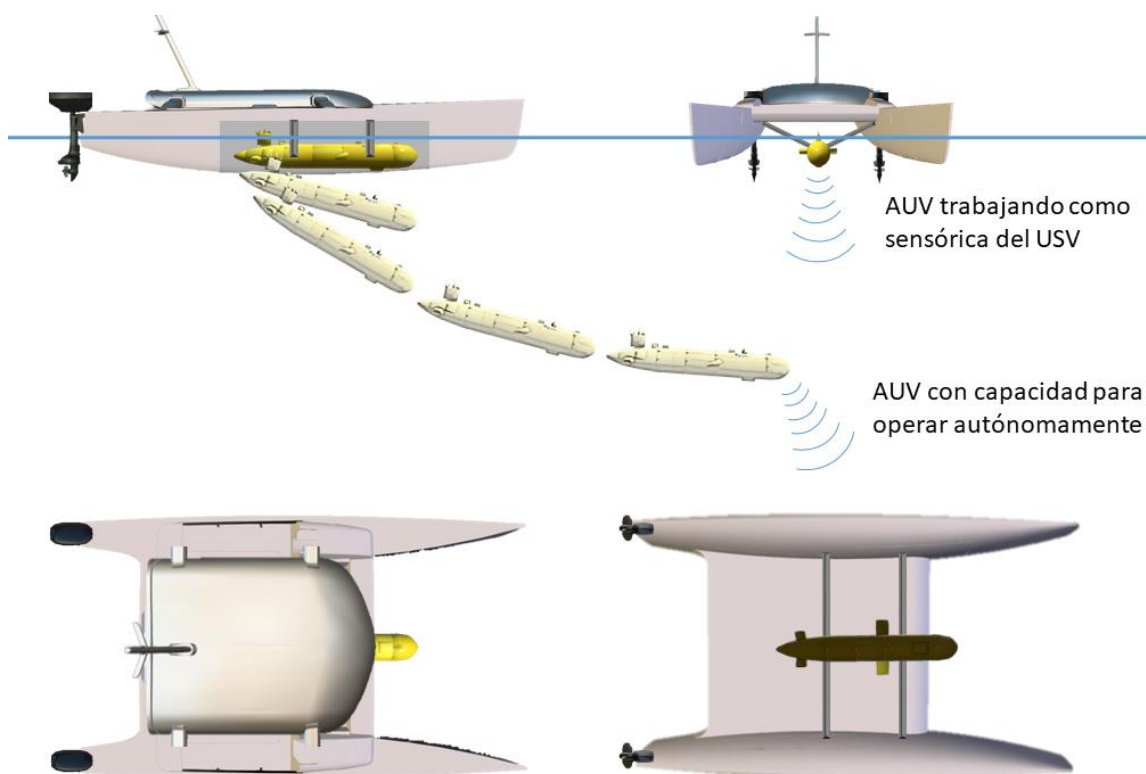


Figura 13. Propuesta de vehículo híbrido USV-AUV basado en un casco tipo SWASSH o SWASH. Elaboración propia.

Finalmente, el material a emplear en la fabricación del casco debe de ser altamente resistente y de bajo peso. Los materiales compuestos muestran mejores propiedades que los materiales metálicos y los plásticos. En general, la mejor combinación son los plásticos reforzados con fibra de vidrio (GFRP), más económico, y con fibra de carbono (CFRP). No obstante, en muchos vehículos se opta por el empleo de diferentes plásticos extruidos que abaratan los costes. Estos materiales son trasladables también a los AUV, donde además hay que tener muy presente la resistencia a la presión hidrostática.

5.1.2. AUV

El planteamiento que se hace para este vehículo es como el de cualquier submarino convencional, con dos cascos: uno interior o resistente, que es en el que se dispondrán todos los sistemas para el correcto funcionamiento del vehículo, así como todo el aparato eléctrico y electrónico; y otro casco exterior o hidrodinámico, a modo de carenado para reducir la resistencia que produce el avance y mejorar así el rendimiento propulsivo.

En el diseño del casco del AUV está condicionado por su empleo en condiciones de inmersión, y el casco con formas curvas e hidrodinámicas, de sección circular, es el más usual. Esto se debe a varios factores: Es una forma geométrica adecuada para resistir la presión hidrostática generada a grandes profundidades, las fuerzas de arrastre que

se generan son pequeñas cuando se comparan con otras geometrías aumentando su autonomía y velocidad, y su simplicidad tiene una repercusión directa en el menor coste de su fabricación. Es necesario aclarar que la forma externa del AUV no es necesariamente la de los compartimientos que alojan los equipos eléctricos y electrónicos. Por otro lado, para contrarrestar la presión hidrostática, muchas veces la cabina es inundada con aceites minerales dieléctricos.

Una parte esencial en el diseño del casco es la forma de la proa, donde por lo general se instalan algunos sensores. Es aconsejable que esta tenga forma ovalada, para mejorar la hidrodinámica, reducir las fuerzas de arrastre del AUV y evitar problemas de cavitación.

En términos de optimización, lo ideal es una geometría sin zona cilíndrica, con forma parabólica en la popa y elíptica en la proa, denominada Albacore, Figura 14. No obstante, dado que la forma Albacore ideal es demasiado compleja para ser aplicada a los vehículos submarinos, al ser muy corta y con mucha curvatura, es aconsejable pasar a una forma más práctica para así poder facilitar su construcción, la forma Albacore modificada, intercalando en medio de una forma Albacore un cilindro del diámetro correspondiente. Esta es en general la más común en los AUV disponibles en el mercado.

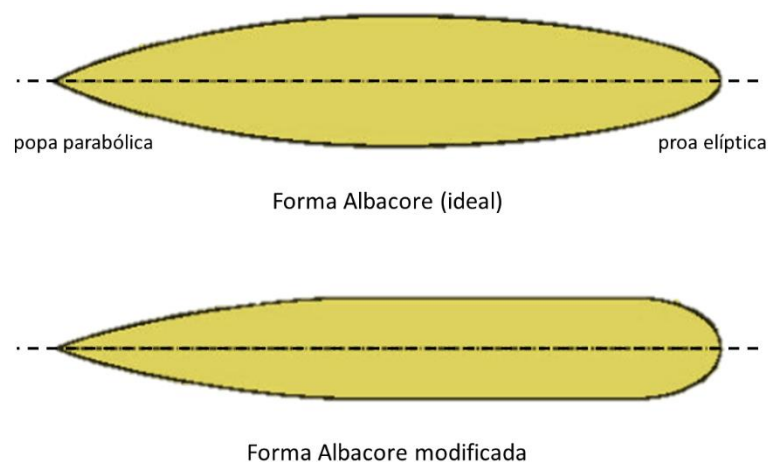


Figura 14. Esquema de forma Albacore ideal y Albacore modificada.

Tal y como se observa en la Figura 15, el casco exterior se subdivide en:

- Popa: La forma de revolución más adecuada es un paraboloide. Suele alojar el impulsor de popa, y timones de control de profundidad y giro.
- Parte cilíndrica. En este cuerpo se emplazan los elementos de control del vehículo, (hardware y software), antena de comunicación en superficie, baterías, y en su caso, timones de profundidad y motores auxiliares. Algunos sensores pueden ir alojados también en esta porción del vehículo.

- Proa: La forma de elipsoide es la ideal. En la mayoría de los vehículos se alojan sensores de navegación y de monitoreo del medio ambiente, y en algunos casos pueden incluir propulsores auxiliares.

Estos tres elementos pueden formar parte de una sola pieza o ser modulares e intercambiables según la necesidad, en combinaciones muy variadas según el fabricante. A mayor eslora y prestaciones, mayor complejidad y capacidades de combinar elementos.

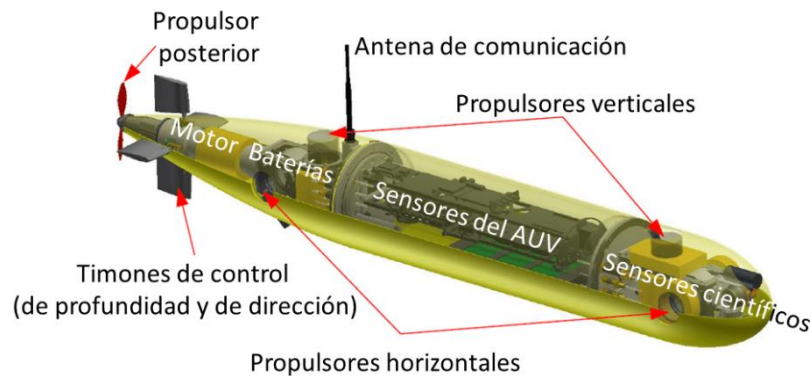


Figura 15. Representación de los componentes generales de un AUV. Adaptado del Delphin 2. (https://www.researchgate.net/figure/Delphin2-AUV-31_fig1_310773236).

5.2. Sistema de propulsión y potencia.

5.2.1. USV.

Los sistemas de propulsión constituidos por el timón y la hélice (o chorro de agua) proporcionan, respectivamente, el control del rumbo y velocidad de la mayoría de los USV monocasco, mientras que otros (principalmente los USV con casco catamarán) son dirigidos por empuje diferencial, provistos por dos motores independientes conectados a cada casco. Pero por lo general estos USV no están equipados con actuadores laterales adicionales y, por lo tanto, pueden considerarse como USV sub-accionados. En otras palabras, el número de propulsores disponibles es menor que los grados de libertad de los USV (DOF) en movimiento. Esto representa un desafío significativo para el control seguro y preciso en los USV infra-accionados. Otros USV completamente accionados, incluso sobre-accionados, son relativamente más fáciles de operar que los USV sub-accionados, llegando a adquirir las prestaciones de un vehículo con posicionamiento dinámico, pero a un coste muy superior.

El sistema de empuje con hélice acoplada a un motor eléctrico es el más utilizado en la mayoría de los USV. Al girar esta, se produce un efecto de empuje al desplazar el fluido de adelante hacia atrás, debido a la diferencia de presión producida. Los modelos matemáticos de impulsores que se han propuesto [29,30] son solo una aproximación para describir su comportamiento, ya que influyen muchos factores tales como la forma, el diámetro y el área de las aspas; la velocidad de giro de la hélice; las

corrientes en el medio; la densidad y viscosidad del agua, etc. Se han presentado diferentes modelos. Frecuentemente, se utiliza un modelo matemático sencillo en el que la fuerza del impulsor es proporcional al cuadrado de la velocidad angular de la hélice, y a su vez esta velocidad es proporcional al voltaje del motor. Lo anterior, bajo el supuesto que las dinámicas de los impulsores tienen unas constantes de tiempo mucho menores que la dinámica de los vehículos [31]. En el caso de vehículos empujados por dos hélices, el trabajo coordinado de avance de una y atrás de otra, evita la necesidad de emplear timones.

En cuanto a la fuente de energía, es uno de los componentes más críticos, no solo de los UVS, si no de todos los vehículos marinos no tripulados (excluyendo los ROV). El tipo de fuente de energía define el tiempo de operación del vehículo, además del volumen y peso del vehículo. Las fuentes de energía más comunes son:

- **Baterías.** Están compuestas por una o más celdas electro-químicas que convierten la energía química almacenada en energía eléctrica. Las mismas se clasifican en primarias y secundarias. Las baterías primarias no se pueden recargar, mientras las baterías secundarias son recargables. Las baterías primarias tienen una mayor densidad de energía que las secundarias (el caso de la Li primaria), sin embargo su empleo es en general más costoso. Dentro del género de las baterías primarias, las más comunes y asequibles son las alcalinas. Las baterías empleadas mayormente en los USV son las secundarias. Hasta hace poco tiempo, las más usadas eran las de Plata-Zinc, pero los recientes avances en las baterías de Li-Ion han hecho de estas una alternativa atractiva [32].
- **Celdas de combustible.** Generan energía eléctrica por medio de una reacción química entre un combustible (por lo general hidrógeno) y un agente oxidante (por lo general oxígeno). Si bien existe una gran diversidad de celdas de combustibles, todas están compuestas por un ánodo, un cátodo y un electrolito que permite el movimiento de cargas. El material empleado como electrolito da origen a los distintos tipos de celdas de combustibles. A diferencia de las baterías, una pila de combustible requiere de un flujo constante de combustible y un elemento oxidante para generar energía eléctrica. Por lo general, poseen mayor autonomía que las baterías.

En [33,34], se presenta un resumen de los aspectos más importantes de las baterías y su empleo en sistemas submarinos. Estos datos han sido adaptados y resumidos en la Tabla 4, en la que se presenta un cuadro comparativo de las distintas baterías y celdas de combustible y su densidad de energía. En USV de mayores dimensiones, el sistema puede estar alimentado por generador de explosión, aunque este no sustituye a las baterías que alimenta y recarga.

Tabla 4: Comparación de capacidad de energía por peso de los distintos tipos de baterías, según Moreno et al., 2014 [34], adaptado a su vez de [31, 33].

| Tipo de Batería | Densidad de Energía(Whr/Kg) | Ciclos de Carga |
|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| Alcalina | 140 | 1 |
| Li primaria | 375 | 1 |
| Plomo-Acido | 31.5 | ~100 |
| Ni-Cd | 33 | ~100 |
| Ni-Zn | 58.5 | ~500 |
| Li-Ion | 144 | ~500 |
| Li-Polímero | 193 | ~500 |
| Plata-Zinc | 100 | ~30 |
| Celda de Acido | 150-1000 | - |
| Celda Alcalina | 250-950 | - |

Existen, no obstante, otros sistemas de propulsión ensayados en los USV, algunos con éxito como la propulsión por inyección que trabaja recogiendo agua del exterior y expulsándola mediante una bomba, que la inyecta a una presión regulable al medio acuático circundante a través de un *jet*. La fuerza de empuje del agua produce una aceleración del USV. Cuando se puede controlar la orientación del jet, es posible obtener un empuje en diversas direcciones, como ocurre con las motos de agua.

Dado el escaso tamaño de la mayor parte de los USV con aplicaciones científicas, la inclusión a bordo de todo un sistema de posicionamiento dinámico (DP, del inglés Dynamic Positioning) resulta complicada si no inviable. Un sistema DP puede definirse como un conjunto de instrumentos del buque que trabajan entre sí para poder mantener una posición fija o seguir una ruta prefijada, utilizando para ello los propulsores del buque. La información sobre los factores externos que alteran el movimiento del buque es recibida por un conjunto de sensores que envían esta información al ordenador. El programa informático, que es configurado para cada tipo de buque, calcula la potencia y orientación necesaria a aplicar por los propulsores para mantener la posición o el rumbo prefijados. En el caso de USV de pequeña eslora, la función que cumpliría un sistema DP puede ser asumida al menos parcialmente por un conjunto de múltiples impulsores, que consiste en colocar un número determinado de impulsores para aportar maniobrabilidad al USV en los grados de libertad requeridos. A pesar de que los impulsores de mayor importancia para ejecutar la navegación se colocan en la popa del vehículo, no hay una regla específica para la ubicación y orientación de ellos. El inconveniente que presenta este tipo de configuración es el alto consumo de energía que aumenta conforme lo hace el número de propulsores, y la implementación y éxito de la misma puede resultar muy complicada.

5.2.2. AUV.

Lo comentado anteriormente para los USV es aplicable a los AUV. En este tipo de vehículo en concreto se puede establecer una diferenciación en los *Gliders*, Figura 16,

un tipo particular de AUV que funciona como un planeador subacuático, y no disponen de impulsor de hélice [34]. Han sido diseñados para navegar desde la superficie del mar hasta una profundidad programada; posteriormente cambian su flotabilidad y cabeceo para ir en dirección ascendente hasta llegar a un punto prefijado donde vuelven a descender; y así sucesivamente. El avance se obtiene por medio de la inclinación de las aletas, que se consigue al combinar pequeñas variaciones de la posición y magnitud de la fuerza de flotabilidad. Como resultado se obtiene un movimiento de desplazamiento diagonal con un mínimo consumo de energía. Mientras se realiza el recorrido, recogen información de temperatura, salinidad, corrientes y otras medidas a lo largo de su trayectoria. A pesar de que la velocidad de estos robots es bastante reducida y el avance está inevitablemente ligado al movimiento vertical, su estructura es ideal para los AUV dedicados a la observación y medición oceanográfica. El mínimo consumo incrementa el tiempo de las misiones a varios meses y aumenta el campo de acción a cientos de kilómetros, esto reduce en gran medida los costes de seguimiento.

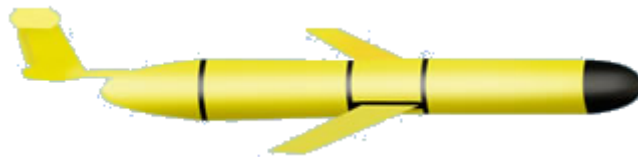


Figura 16. AUV planeador (sin propulsión) o *Glider* (<http://medcliv.es/es/instrumentos/glider/>)

5.3. Modelo cinemático y dinámico de los USV y los AUV.

El modelado cinemático permite plantear la velocidad de un vehículo a través de una serie de ecuaciones que relacionan los diferentes tipos de coordenadas que definen el movimiento, mientras que el modelado dinámico describe las fuerzas que actúan sobre el vehículo cuando este navega.

Cuando se analiza el movimiento vehículo en un fluido, ya sea un avión o un RPAS en el aire, o de un USV o un AUV en el medio marino, es necesario definir dos marcos de referencia para describir su movimiento:

- 1) Un marco de referencia inercial (NED, del inglés North-East-Down), que se encuentra ubicado sobre la superficie terrestre, y en el que el eje X apunta hacia el norte, el eje Y apunta hacia el este, y el eje Z apunta hacia abajo y es normal a la superficie terrestre. De esta forma el plano X – Y es tangente en la superficie de la tierra.
- 2) Un marco de referencia del cuerpo del vehículo (B, del inglés Body). El origen de este marco de referencia se hace coincidir generalmente con el centro de gravedad del vehículo, cuando este se encuentra en el plano principal de simetría, o en algún otro punto conveniente si este no es el caso. Los ejes de este marco se eligen de tal

forma que coincidan con los ejes principales de inercia, siendo X el eje longitudinal (que va de popa a proa), Y el eje transversal (que va de un lado al otro), y Z que va dirigido hacia abajo.

En navegación marina y en robótica submarina se asume la convención de la SNAME (*Society of Naval Architects and Marine Engineers*) de 1950 [35] para expresar la posición, orientación del vehículo y las fuerzas que se ejercen sobre él. En la Tabla 5 se presentan los nombres de los movimientos en castellano e inglés de vehículo. En la Figura 17 trata de expresarse visualmente esta notación.

Tabla 5. Notación según SNAME (1950) [35] del movimiento de vehículos marinos.

| Movimiento | Denominación | | Posición |
|-----------------|---------------------|--------|----------|
| | Español | Inglés | |
| Traslación en x | Avance | Surge | x |
| Traslación en y | Desvío | Sway | y |
| Traslación en z | Movimiento vertical | Heave | z |
| Rotación en x | Alabeo | Roll | ϕ |
| Rotación en y | Cabeceo | Pitch | θ |
| Rotación en z | Guiñada | Yaw | Ψ |

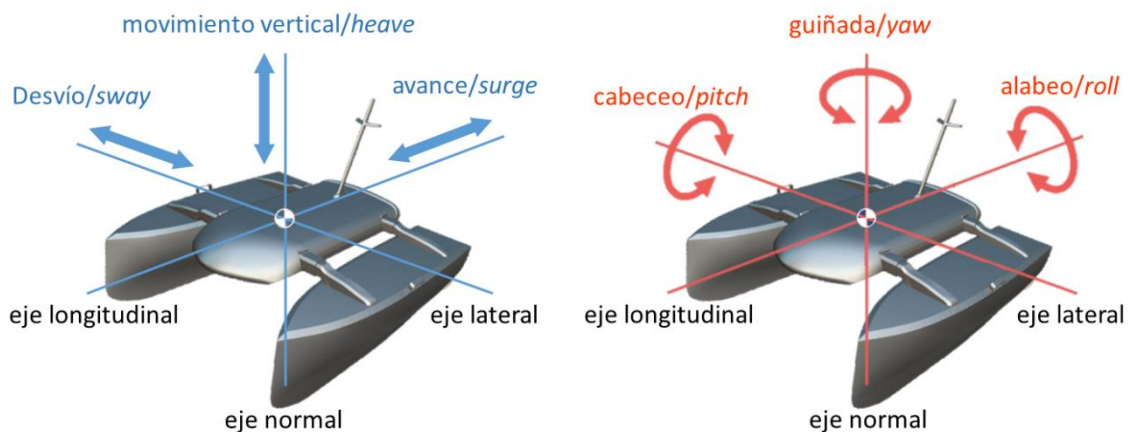


Figura 17. Movimientos de traslación (azul) y rotación (naranja) de un USV. Elaboración propia.

El estudio cinemático del vehículo, descrito con mayor amplitud en [34], se llevará a cabo mediante el planteamiento de las matrices de rotación adecuadas, y el establecimiento de los ángulos y los parámetros de Euler. Estos estudios llevarán a cabo durante la selección del casco más adecuado para las condiciones de trabajo que se le exigirá al USV en sus diferentes misiones.

El modelo dinámico de los USV y los AUV describe la relación existente entre los movimientos del vehículo y las fuerzas que se ejercen sobre el mismo. De esta manera, se pueden calcular las fuerzas externas necesarias para que el vehículo se mueva de una forma determinada o, por el contrario, se puede determinar el movimiento generado por las fuerzas externas a las que el vehículo está sujeto. El vehículo estará sometido a diferentes tipos de fuerzas. Estas fuerzas son principalmente:

- Fuerzas inerciales: como las centrífugas y de Coriolis.
- Fuerzas hidrodinámicas: son las fuerzas de masa añadida y las fuerzas viscosas, y dependen de muchas variables como las características del fluido, la temperatura, la presión y la forma geométrica del vehículo entre otras.
- Fuerzas de restitución: los vehículos marinos son afectados por la gravedad y las fuerzas de flotación.

Como en el caso de estudio cinemático, el dinámico proponerse una vez seleccionado el vehículo más adecuado para las misiones encomendadas.

6. Control de los USV y AUV

En [36, 37] se presenta el concepto del Sistema de Control de la Misión (MCS, del inglés por Mission Control System). El MCS es el conjunto de programas responsables de que los USV y AUV lleven a cabo la misión que se les ha encomendado. El MCS contiene los elementos de Guiado, Control y Navegación o GNC (del inglés Guidance, Navigation and Control System), el componente más importante de estos vehículos, Figura 18. Los módulos GNC están constituidos generalmente por ordenadores y software integrados, y en su conjunto son responsables de administrar todo el sistema. Las tareas de la misión son generalmente concurrentes y su manejo depende del estado del vehículo y de las condiciones ambientales; por lo tanto, el MCS maneja las tareas, eventualmente suprimiéndolas y definiendo su secuencia (modificando y priorizando). El MCS está compuesto por los siguientes sistemas según [34]:

- Sistema de Guiado. Encargado de generar las trayectorias que debe seguir el vehículo durante la misión. La información sobre la posición, velocidad y aceleración es enviada al Sistema de Control, el cual tratará de alcanzar las referencias deseadas. El Sistema de Guiado tiene como entradas los Puntos Guía definidos por el usuario, e información proveniente del Sistema de Navegación. Además, puede recibir información sobre la situación del ambiente (e.g. corrientes marinas), de la topografía del fondo marino, y datos provenientes de un sonar para la detección de obstáculos. No obstante, actualmente algunos vehículos constan de un módulo de planificación dinámica que les permite replanificar durante la misión y pasarle al Sistema de Guiado puntos guía que no fueron definidos previamente [38].

- Sistema de Control. Es el encargado de calcular las fuerzas necesarias que debe generar el sistema de propulsión para que el vehículo alcance las referencias deseadas. La construcción del Sistema de Control involucra el diseño y la sintonización de las Leyes de Control que regularán los movimientos del robot. El Sistema de Control recibe información la posición, velocidad y aceleración deseada y el estado actual de estas variables medidas a través de los sensores del vehículo. Este sistema puede consistir de leyes de control clásico, control no lineal, control inteligente, sistemas basados en comportamiento (*behavior-based*), etc.
- Sistema de Navegación. Recibe la información de los sensores de posición, velocidad y aceleración del vehículo. Mediante un Observador u otros algoritmos procesa esta información y posteriormente la envía al Sistema de Guiado y al Sistema de Control.

Estos subsistemas funcionan en interacción entre ellos, hasta el punto de que defectos en un subsistema pueden disminuir el rendimiento de todo el sistema o llevarlo a su colapso. En la Figura 18 se presenta un esquema con la estructura general de los sistemas de guía, navegación y control de un vehículo autónomo, adaptado de [5].

7. Sensores de a bordo

Los USV y AUV están equipados con sistemas de sensores dedicados a determinar su localización, velocidad y aceleración, así como su estado de funcionamiento. Los sensores permiten controlar los movimientos del vehículo, lo cual a su vez permite que este pueda realizar la misión que le fue encomendada. Se puede clasificarlos como:

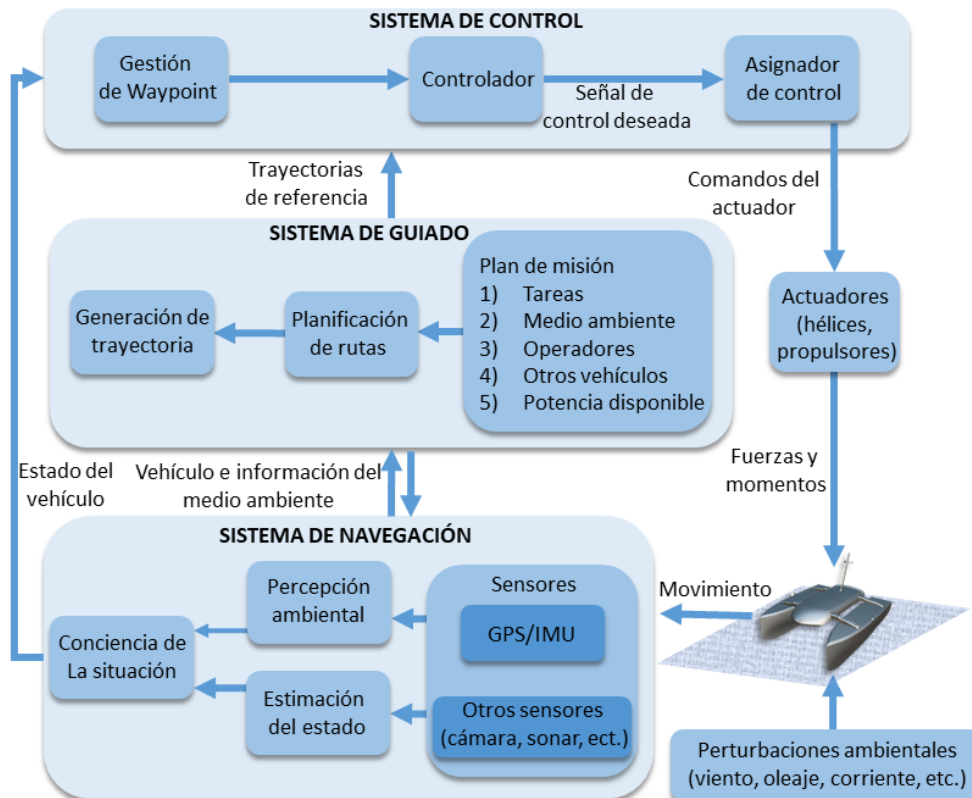


Figura 18. Estructura general de los sistemas de guía, navegación y control de un vehículo autónomo, adaptado de Liu et al., 2016 [5].

1) Sensores de medición del ambiente: son aquellos que se utilizan para determinar las características del medio que los rodea (sonar, conductividad, pH, densidad, turbidez, oxígeno disuelto, temperatura, etc.). Estos sensores, relacionados con las misiones específicas que pueden realizar los vehículos, no tienen cabida en este primer informe.

2) Sensores de posicionamiento: son aquellos que permiten determinar la posición, orientación, velocidad y aceleración del vehículo con respecto a un marco de referencia inercial o con respecto a otros objetos de interés. A continuación se presentan algunos de los sensores que utilizan la mayoría de los USV y AUV, aunque su funcionamiento puede diferir en uno u otro caso:

- Sistema de Posicionamiento Global (GPS): permite determinar la posición de un objeto en cualquier parte del mundo. Estos se utilizan en continuo en los USV, o intermitentemente en los AUV cuando emergen a superficie (no pueden usarse debajo del agua).
- Unidad de medición inercial (IMU): Proporciona información acerca de la aceleración lineal del vehículo y la velocidad angular. La IMU que se utiliza en los USV y AUV se basa en tres giróscopos que permiten hacer las mediciones de los ángulos de cabeceo, alabeo y guiñada, para luego transmitirlos a otro equipo por medio de un canal de comunicación. En la actualidad, las IMU son equipos

pequeños que integran giróscopos y acelerómetros en la electrónica, incluso hay algunas que tienen una brújula electrónica.

- Brújula de estado sólido: se basa en la detección de los campos magnéticos de la Tierra, empleando dos o tres magnetorresistencias o sensores de efecto Hall colocados a 90° entre ellos. Mediante un cálculo vectorial determinan la posición norte o de referencia horizontal. Pueden proveer estimaciones del Norte magnético con una exactitud de 1° si se calibran cuidadosamente para compensar las perturbaciones magnéticas del vehículo.
- Velocímetro Doppler de Navegación: se basa en la transmisión de tres o cuatro ondas ultrasónicas, con dirección diagonal hacia el fondo, ligeramente inclinado a los lados, al frente y hacia atrás. El dispositivo cuenta con un circuito de procesamiento que, mediante el análisis de los ecos recibidos y sus correlaciones, calcula la velocidad, y la posición se obtiene indirectamente por odometría. La operación del velocímetro de Doppler está limitada a un cierto nivel con respecto al fondo marino.
- Sonar para detección de obstáculos. Consiste en uno o varios emisores (proyectores acústicos) y uno o varios receptores (hidrófonos). Al haber una transmisión de la señal acústica ultrasónica, se determina la distancia de los objetos detectados, de acuerdo a la velocidad y el tiempo recorrido por el sonido en el agua. Los sonares se pueden utilizar para estimar la distancia a un objeto (un bajo rocoso), generar imágenes del fondo marino (arqueología submarina) y realizar mapas batimétricos.
- Los sistemas de visión entran en esta categoría de dispositivos cuando son utilizados para determinar la posición y orientación de objetos con respecto al vehículo.

Para el caso particular de los AUV hay otros dos sensores necesarios para su correcta operación:

- Sensor de profundidad. Un método para medir la profundidad consiste en colocar un sensor de presión absoluta cuyo punto de medición se pone en contacto con el agua. Debido a que la presión ejercida en el sensor es proporcional a la columna de agua multiplicada por su densidad (más la presión atmosférica), se puede obtener su valor.
- Sistemas de Posicionamiento Acústico: permiten determinar la posición del AUV en x-y-z. Estos sistemas se basan en dos dispositivos que reciben y emiten señales acústicas, estos son el transceptor y transpondedor. El transceptor está montado en el AUV y los transpondedores están ubicados en emplazamientos de ubicación es conocida. El transceptor envía una señal acústica que es recibida por al menos tres transpondedores. Los transpondedores responden a esta señal, emitiendo otra

señal acústica (que los identifica a cada uno) que recibe el transceptor. La distancia a cada transpondedor se mide a partir del tiempo en que se tarda en llegar la señal acústica. Mediante triangulación se determina la posición del AUV.

3) Sensores de estado interno: permiten determinar el consumo de energía del vehículo, una posible inundación, la temperatura interna del vehículo, etc.

- Medición de Consumo Eléctrico: Tanto en las baterías como en los motores. Por un lado se emplean voltímetros, unos convertidores analógicos a digital que suelen estar integrados a un microcontrolador o un procesador digital de señales. Por otro, los amperímetros, consistentes en una resistencia de precisión colocada en serie al circuito que se le desea medir el consumo. En algunos casos la corriente eléctrica se puede determinar por medio de sensores de efecto Hall colocados cerca de los cables de alimentación. Esto permitirá determinar el consumo de corriente en cada motor y módulo del vehículo, con el objeto de calcular el consumo de potencia y gestionar la distribución de energía del USV o del AUV.
- Detector de Inundación. Este dispositivo informa al operador o al ordenador de a bordo si hay problemas de estanqueidad. Para detectar la entrada de agua en el interior hay tres tipos de sensores de inundación: de humedad, conductividad y óptico. De estos, el sensor óptico es el más práctico, ya que el de humedad reacciona con retardo y el de conductividad está expuesto al ruido eléctrico de los componentes del vehículo. El detector óptico se basa en la colocación de un prisma con un índice de refracción similar al del agua en la parte inferior interna. Su funcionamiento consiste en emitir una señal óptica mediante un led, y se detecta si hay reflexión o no dentro del prisma.

Existen otros elementos de vital importancia en el manejo de los USV y AUV, que como tales no pueden considerarse sensores:

Sistemas de comunicación: incluyen no solo la comunicación inalámbrica con estaciones de control en tierra y otros vehículos para realizar el control cooperativo, sino también la comunicación a bordo/inalámbrica con una variedad de sensores, actuadores y otros equipos. Su fiabilidad es, por lo tanto, de suma importancia.

Estación terrestre: juega un papel importante en el sistema GNC del vehículo, y puede ubicarse en una instalación en tierra, un vehículo móvil o un barco en alta mar. Las misiones se pueden asignar a los vehículos a través de sistemas de comunicación inalámbrica. El estado en tiempo real del USV o AUV y su equipo a bordo son monitoreados por la estación terrestre, mientras que para los USV operados remotamente, los comandos de control también se envían desde la estación terrestre.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Autorización de pruebas o ensayos de investigación realizados con vehículos de conducción automatizada en vías abiertas al tráfico en general. Subdirección General de Gestión de la Movilidad del Ministerio del Interior del Gobierno de España en su Instrucción 15/V-113, 13 de noviembre de 2015.
- [2] Lloyd's Register, Design Code for Unmanned Marine Systems, Febrero 2017. [En línea]: <https://www.cdinfo.lr.org/information/documents/ShipRight/Design%20and%20Construction/Additional%20Design%20Procedures/Design%20Code%20for%20Unmanned%20Marine%20Systems/Design%20Code%20for%20Unmanned%20Marine%20Systems,%20February%202017.pdf>.
- [3] Bureau Veritas, Guidelines for Autonomous Shipping, Diciembre 2017. [En línea]: https://www.bureauveritas.jp/news/pdf/641-NI_2017-12.pdf.
- [4] Manley, J. E. (2008) Unmanned surface vehicles, 15 years of development. In Proceedings of IEEE international conference on OCEANS, pp. 1–4.
- [5] Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., Yuan, C. (2016) Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges, *Annual Reviews in Control*, 41, 71–93
- [6] Roberts, G.N., Sutton, R. (Eds.). (2006). *Advances in unmanned marine vehicles*. The Institution of Engineering and Technology.
- [7] Goudey, C.A., Consi, T., Manley, J., Graham, M., Donovan, B., & Kiley, L. (1998). A robotic boat for autonomous fish tracking. *Marine Technology Society Journal*, 32 (1), 47–53.
- [8] Majohr, J., Buch, T. (2006). Modelling, simulation and control of an autonomous surface marine vehicle for surveying applications measuring dolphin MESSIN. *IEE Control Engineering Series*, 69, 329–352.
- [9] Jung, S., Kim, K., Myung, H. (2017) Development of Algal Bloom Removal System Using Unmanned Aerial Vehicle and Surface Vehicle, *IEEE Access*, Vol. 5 22166-22176.
- [10] Vaneck, T.W., Rodriguez-Ortiz, C.D., Schmidt, M.C., Manley, J.E. (1996). Automated bathymetry using an autonomous surface craft. *Navigation*, 43 (4), 407–417.
- [11] Breivik, M. (2010). *Topics in guided motion control of marine vehicles*. Norwegian University of Science and Technology (Ph.D. thesis).
- [12] Roman, C., Mather, R. (2010) Autonomous underwater vehicles as tools for deep-submergence archaeology, y. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* 224 (4): 327-340.
- [13] Caccia, M., Bono, R., Bruzzone, G., Spirandelli, E., Veruggio, G., Stortini, A. M. (2005). Sampling sea surfaces with SESAMO: An autonomous craft for the study of sea-air interactions. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 12 (3), 95–105.
- [14] Naeem, W., Xu, T., Sutton, R., Tiano, A. (2008). The design of a navigation, guidance, and control system for an unmanned surface vehicle for environmental monitoring. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 222 (2), 67–79.
- [15] Rasal, K. (2013). *Navigation and control of an automated SWATH surface vessel for bathymetric mapping*. Santa Clara University (Ph.D. thesis).
- [16] Svec, P., Thakur, A., Raboin, E., Shah, B. C., Gupta, S.K. (2014). Target following with motion prediction for unmanned surface vehicle operating in cluttered environments. *Autonomous Robots*, 36 (4), 383–405.
- [17] Murphy, R.R., Steimle, E., Griffin, C., Cullins, C., Hall, M., Pratt, K. (2008). Cooperative use of unmanned sea surface and micro aerial vehicles at hurricane Wilma. *Journal of Field Robotics*, 25 (3), 164–180.
- [18] Pastore, T., Djapic, V. (2010). Improving autonomy and control of autonomous surface vehicles in port protection and mine countermeasure scenarios. *Journal of Field Robotics*, 27 (6), 903–914.

- [19] Bertram, V. (2008). Unmanned surface vehicles—A survey. In Proceedings of Skibsteknisk Selskab, Copenhagen, Denmark.
- [20] Breivik, M., Hovstein, V.E., & Fossen, T. I. (2008). Straight-line target tracking for unmanned surface vehicles. *Modeling, Identification and Control*, 29 (4), 131–149.
- [21] Karimanzira, D., Jacobi, M. Pfuetschenreuter, T., Rauschenbach, T., Eichhorn, M., Tauber R., Ament C. (2014) First testing of an AUV mission planning and guidance system for water quality monitoring and fish behavior observation in net cage fish farming, *Information Processing in Agriculture*, Volume 1, Issue 2, December 2014, Pages 131-140.
- [22] Wynn, R.B., Huvenne, V.A.I., Le Bas, T.P., Murton, B.J., Connelly, D.P.... (2014) Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience, *Marine Geology*, Volume 352, Pages 451-468
- [23] Caccia, M., Bibuli, M., Bono, R., Bruzzone, G., Bruzzone, G., Spirandelli, E. (2007). Unmanned surface vehicle for coastal and protected waters applications: The charlie project. *Marine Technology Society Journal*, 41 (2), 62–71.
- [24] Kucik, D. (2004). U.S. Patent nº. 6,712,312. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [25] Svec, P., and Gupta, S.K. (2012). Automated synthesis of action selection policies for unmanned vehicles operating in adverse environments. *Autonomous Robots*, 32 (2), 149–164.
- [26] Kiencke, U., Nielsen, L., Sutton, R., Schilling, K., Papageorgiou, M., Asama, H. (2006). The impact of automatic control on recent developments in transportation and vehicle systems. *Annual Reviews in Control*, 30 (1), 81–89.
- [27] Caccia, M., Bibuli, M., Bono, R., Bruzzone, G. (2008). Basic navigation, guidance and control of an unmanned surface vehicle. *Autonomous Robots*, 25 (4), 349–365.
- [28] Zwolak, K., Simpson, B., Anderson, B., Bazhenova, E., Falconer, R., Kearns, T., Minami, H., Roperez, J., Rosedee, A., Sade, H., Tinmouth, N., Wigley, R., Zarayskaya, Y. (2017) An unmanned seafloor mapping system: the concept of an AUV integrated with the newly designed USV, *SEA-KIT OCEANS 2017 – Aberdeen*, 1-7.
- [29] Yoerger, D., Cooke, J. J. S. (1990) The influence of thruster dynamics on underwater vehicle behavior and their incorporation into control system design. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 15 (3), 167-178.
- [30] Bachmayer, R., Whitcomb, L., Grosenbaugh, M. (2000) An accurate four quadrant nonlinear dynamical model for marine thrusters. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 25 (1), 146-159.
- [31] Yuh, J. (2000) Design and control of autonomous underwater robots: A survey. *Auton. Robots*, 8 (1), 7-24.
- [32] Wang, W., Engelaar, R., Chen, X., Chase, J. (2009) The state-of-art of underwater vehicles - theories and applications. *Mobile Robots - State of the Art in Land, Sea, Air, and Collaborative Missions*, X.Q. Chen, Y.Q. Chen and J.G. Chase (Ed.), InTech.
- [33] Bradley, A., Feezor, M., Singh, H., Sorrell, F., (2001) Power systems for autonomous underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 26 (4), 526538.
- [34] Moreno, H.A., Saltarén, R., Puglisi, L., Carrera, I., Cardenas, P., Álvarez, C. (2014) Robótica Submarina: Conceptos, Elementos, Modelado y Control, *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 11, 3–19.
- [35] SNAME, 1950. Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. The Society of Naval Architects and Marine Engineers. Technical and Research Bulletin No. 1-5.
- [36] Fossen, T. (2002). *Marine Control Systems. Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetics. Trondheim, Norway.
- [37] Antonelli, G., Fossen, T. I., Yoerger, D. R. (2008). *Underwater Robotics*. In: Siciliano, B., Khatib, O. (Eds.), *Springer Handbook of Robotics*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Ch. 44, pp. 987-1008

[38] Acosta, G., Curti, H., Calvo, O., Rossi, S. (2008) Some issues on the design of a low-cost autonomous underwater vehicle with an intelligent dynamic mission planner for pipeline and cable tracking. In: Inzartsev, A. (Ed.), Underwater Vehicles. InTech, Ch. 1, pp. 1-19.



Interreg

España - Portugal



UNIÓN EUROPEA
UNIÃO EUROPEIA

Fondo Europeo de Desarrollo Regional
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional